



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo de un sistema  
para la producción de  
hidrógeno verde con  
geotermia: integración de  
electrólisis con ciclo Rankine  
orgánico**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Ricardo Ortiz Estrada

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	IV
LISTA DE TABLAS .....	VIII
NOMENCLATURA.....	X
RESÚMEN .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS PARTICULARES .....	3
1 ESTADO DEL ARTE DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO .....	4
1.1 DESCRIPCIÓN .....	4
1.2 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO .....	4
1.3 VERSATILIDAD DE APROVECHAMIENTO COMO COMBUSTIBLE .....	5
1.4 PERSPECTIVA DE LA DEMANDA Y PRODUCCIÓN DE h <sub>2</sub> HASTA 2030 .....	7
1.4.1 DEMANDA DE H <sub>2</sub> HASTA 2030.....	7
1.4.2 PRODUCCIÓN DE H <sub>2</sub> HASTA 2030 .....	10
1.5 MARCO AMBIENTAL .....	11
1.5.1 TIPOS DE HIDROGENO PRODUCIDOS .....	12
1.6 MARCO ESTRATÉGICO Y NORMATIVO .....	15
1.6.1 MUNDIAL .....	15
1.6.2 NORMATIVA INTERNACIONAL ISO.....	20
1.6.3 MARCO LEGAL EN MÉXICO .....	22
1.7 MARCO TÉCNICO DE LA PRODUCCIÓN DE H <sub>2</sub> VERDE.....	27
1.7.1 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN .....	27
1.7.2 HIDRÓGENO AZUL.....	27
1.7.3 HIDRÓGENO VERDE .....	31

1.7.4	EFICIENCIAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CELDAS Y SELECCIÓN DE MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE $H_2$ .....	37
1.8	CONCLUSIONES DEL CAPITULO .....	38
2	POSIBLES FUENTES DE ENERGÍA .....	39
2.1	ENERGÍA EÓLICA .....	39
2.2	ENERGÍA SOLAR.....	40
2.3	ENERGÍA HIDRÁULICA .....	43
2.4	BIOMASA .....	44
2.5	ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	47
2.5.1	RECURSO GEOTÉRMICO HIDROTHERMAL .....	50
2.5.2	RECURSO GEOTÉRMICO SECO .....	51
2.5.3	BAJA, MEDIA Y ALTA ENTALPÍA.....	51
2.5.4	USOS EN CASCADA .....	52
2.6	CICLOS ORC Y FUENTES DE ENERGÍA.....	54
2.6.1	EQUIPOS Y FUNCIONAMIENTO DE UN ORC.....	55
2.6.2	APLICACIONES Y DISPONIBILIDAD DE LOS CICLOS DE POTENCIA EN GEOTERMIA .....	56
2.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2 .....	59
3	CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA PEM .....	60
3.1	BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA UNA CELDA ELECTROLÍTICA .....	60
3.1.1	BALANCE DE ENERGÍA .....	60
3.1.2	MEMORIA DE CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE REACCIÓN.....	66
3.1.3	BALANCE DE MASA ESTEQUIOMÉTRICO.....	68
3.1.4	CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA PEM CON CURVAS DE POLARIZACIÓN .....	68

	3.2	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3 .....	77
PEM	4	INTEGRACIÓN DEL CBM IIDEA100 CON UN ELECTROLIZADOR 79	
	4.1	CICLO BINARIO MODULAR IIDEA100.....	79
	4.1.1	INGENIERÍA DEL CBM100 .....	79
PEM	4.2	ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA INSTALACIÓN CBM/ORC- 81	
	4.2.1	PROPUESTA DE LA INSTALACIÓN CBM/ORC-PEM .....	81
	4.2.2	BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DE LA INSTALACIÓN .....	84
	4.2.3	COMPORTAMIENTO DE LA INSTALACIÓN .....	87
	4.2.4	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA CBM/ORC- PEM.....	88
	4.2.5	COSTOS DE H <sub>2</sub> VERDE PRODUCIDO POR DIFERENTES FUENTES	90
	4.3	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4 .....	93
	5	CONCLUSIONES GENERALES .....	94
	6	REFERENCIAS .....	97
		ANEXOS DEL CAPÍTULO 1 .....	104
		DENSIDAD ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO .....	104
		ANEXOS DEL CAPÍTULO 2 .....	105
		capACIDAD INSTALADA DE CFE Y PERMISIONARIOS HASTA 2036..	105
		SEGUIMIENTO ANUAL DEL DESARROLLO DE LA MATRIZ ENERGÉTICA MEXICANA.....	106
		CAPACIDAD INSTALADA EN MÉXICO HASTA DICIEMBRE 2022.....	106
		PLANO DE LAS PLACAS TECTÓNICAS DE LA CORTEZA TERRESTRE .....	107
		LISTA DE FLUIDOS DE TRABAJO PARA CICLOS ORGÁNICOS RANKINE .....	109

ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y PROPIETARIA, QUE NO DEBE SER PUBLICADA Y DIVULGADA A OTROS, REPRODUCIDA Y/O UTILIZADA PARA OTRO PROPÓSITO QUE NO SEA PARA EL CUAL FUE ELABORADO, SIN PERMISO PREVIO ESCRITO POR GRUPO IIDEA O EL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM”.

EQUIPOS PARA UN ORC .....	110
ANEXOS DEL CAPÍTULO 3 .....	112
MEMORIA DEL CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA CONDICIONES ESTÁNDAR DE LA REACCIÓN ELECTROLÍTICA.....	113
MEMORIA DE CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE REACCIÓN .....	5
HOJA DE DATOS TÉCNICOS DE LA MEMBRANA PEM.....	6
GRAFICAS DE FLUJOS MÁSICOS PARA REACTIVOS/PRODUCTOS .....	8
ANEXOS DEL CAPÍTULO 4 .....	11
FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE REFRIGERANTE DEL CBM IIDEA100 .....	11
FICHA TÉCNICA DEL REFRIGERANTE R1233ZD .....	14

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de la reversibilidad del proceso de una celda de combustible.....	7
Figura 2 Demanda de hidrógeno por sector y por región en las políticas y acuerdos, 2019-2030 (IEA, 2022) .....	8
Figura 3 Producción planeada de hidrógeno de bajas emisiones para refinamiento, por tecnología y región, 2018-2030 (IEA, 2022).....	9
Figura 4 Costo desglosado por componentes y costo de inversión de un electrolizador PEM de 1 MW (Embajada de Dinamarca, 2023).....	10
Figura 5 Producción de H <sub>2</sub> de bajas emisiones para 2020 y 2030 en distintas regiones, divididas por origen (IEA, 2022).....	11
Figura 6 Capacidad instalada y planeada a nivel global de electrolizadores, 2018-2030 (IEA, 2022).....	13
Figura 7 Comportamiento de la capacidad instalada, 2018-2030, de la tecnología para electrólisis a nivel mundial. Hecha con datos de (IEA, 2022). .....	14
Figura 8 Comportamiento de la capacidad planeada o bajo construcción, 2023-2030, de la tecnología para electrólisis a nivel mundial. Hecha con datos de (IEA, 2022). .....	14
Figura 9 Países con estrategias nacionales de hidrógeno en efecto o bajo planeación (IEA, 2022).....	16
Figura 10 Alineación de metas de energías limpias y eficiencia energética en los instrumentos de planeación de la Ley de Transición Energética, tomado de (Secretaría de Energía , 2020). .....	25
Figura 11 Oferta de la matriz energética mexicana, 2019-2021, elaborado con (Secretaría de Energía, 2023) .....	26
Figura 12 Diagrama del funcionamiento de SR, tomado de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).....	28
Figura 13 Diagrama de un proceso de reformado POX, tomado de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014). .....	29
Figura 14 Diagrama de un proceso, térmico neutral, ATR; tomado de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).....	30
Figura 15 Diagrama del funcionamiento de una celda AEM para electrólisis, figura tomada de (Bessarabov & Millet, 2018).....	33

Figura 16 Diagrama del funcionamiento de una celda alcalina líquida para electrólisis, figura tomada de (Bessarabov & Millet, 2018). .....	34
Figura 17 Funcionamiento de una celda PEM, tomada de (Smolinka, 2010). .....	35
Figura 18 Funcionamiento básico de una celda SOEC, figura tomada de (Bessarabov & Millet, 2018). .....	36
Figura 19 Comportamiento de la energía total necesaria para producir 1 mol de hidrógeno en una celda SOEC, figura tomada de (Leung, Ni, & Leung, 2014) .....	36
Figura 20 Capacidad total instalada de energía eólica MW, 2010-2022 (World Wind Energy Association, 2022) .....	39
Figura 21 Parques eólicos en operación, en México, 2022, tomado de (Asociación Mexicana de Energía Eólica, 2018). .....	40
Figura 22 Plantas de energía solar, marcadas en amarillo, en México para 2023. Tomada de (Asociación Mexicana de Energía Solar, 2023). .....	41
Figura 23 Mapa de irradiación directa normal en México, tomado de (SOLARGIS, 2017). .....	42
Figura 24 Generación eléctrica de baja emisión por tecnología, 2020. ....	43
Figura 25 Generación eléctrica a partir de energía hidráulica en la matriz energética mexicana, 2019-2022. ....	44
Figura 26 Vista esquemática de una variedad de rutas comerciales (líneas sólidas) y en desarrollo (líneas punteadas) de la fuente de biomasa, proceso de conversión y el producto resultante. Los productos comerciales están indicados con un asterisco. ....	46
Figura 27 Adiciones a la capacidad instalada a la Red Eléctrica al 31 de diciembre de 2022 (MW) (Centro Nacional de Control de Energía, 2023) .....	47
Figura 28 Estructura interna de la Tierra con las capas determinadas por medio de datos sismológicos (Prol Ledesma, 1996). .....	48
Figura 29 Modelo esquemático de un sitio con recurso geotérmico hidrotermal ....	50
Figura 30 Diagrama de Lindal (Prol Ledesma, 1996); <b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 31 Tendencia de generación eléctrica de todos los países con actividad geotérmica, 2011-2020. (IRENA, 2022). .....	52
Figura 32 Capacidad instalada de energía geotérmica en México. (Global Geothermal	

Alliance, SF).....	53
Figura 33 Diagrama de flujo de proceso simplificado de un ciclo binario.....	57
Figura 34 Comportamiento de una curva típica I-U de un electrolizador a diferentes temperaturas .....	64
Figura 35 Comportamiento de las propiedades de la reacción electrolítica del agua a diferentes temperaturas.....	67
Figura 36 Metodología para la creación de curvas de polarización a partir del cálculo de pérdidas de voltaje .....	69
Figura 37 Curva de polarización calculado del voltaje reversible a diferentes temperaturas .....	70
Figura 38 Curva de polarización del voltaje de activación calculado a diferentes temperaturas .....	71
Figura 39 Curva de polarización del voltaje de difusión calculado a diferentes temperaturas .....	72
Figura 40 Curva de polarización del voltaje total en relación a la densidad de corriente y la temperatura de reacción.....	74
Figura 41 Comportamiento de los flujos máxicos de los reactivos/productos .....	76
Figura 42 Reducción del voltaje total requerido en el electrolizador en función de la temperatura de reacción.....	77
Figura 43 Comportamiento esperado del incremento de flujo respecto al aumento de la temperatura .....	78
Figura 44 Diagrama de flujo del proceso del CBM IIDEA100.....	80
Figura 45 Diagrama esquemático de un sistema típico de electrolisis de agua para la producción de hidrógeno con precalentamiento de agua, tomado de (Houcheng, Guoxing , & Jincan, 2010).....	82
Figura 46 Vistas de la instalación del CBM IIDEA100 .....	83
Figura 47 Diagrama de flujo de la instalación propuesta .....	84
Figura 48 Diagrama T-S del sistema ORC CBM IIDEA100 .....	85
Figura 49 Curva de operación de las diferentes series de bombas SERO.....	86

Figura 50 Desempeño de la instalación propuesta CBM/ORC-PEM .....	89
Figura 51 Disminución del voltaje total en la instalación con precalentamiento.....	93
Figura 52 Densidad energética, en base volumétrica y másica, de distintos recursos energético (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).....	104
Figura 53 Capacidad instalada a la Red Eléctrica, en operación y pruebas del SEN (MW) al 31-diciembre-2022 (Centro Nacional de Control de Energía, 2023) .....	106
Figura 54 Disposición de las placas tectónicas que componen la corteza terrestre (United States Geological Service, SF) .....	107
Figura 55 Uso de energías renovables , por tecnología en México, 2021, IRENA <a href="https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy">https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy</a> .....	108
Figura 56 Intercambiador de calor de tubos y coraza (Astolfi, 2017).....	110
Figura 57 Intercambiador de calor de serpentín, diseñado y fabricado por ITISA.	111
Figura 58 Comportamiento del flujo másico del hidrógeno producido .....	8
Figura 59 Comportamiento del flujo másico del oxígeno producido.....	9
Figura 60 Comportamiento del flujo másico del agua desionizada requerida .....	10

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Usos del H <sub>2</sub> en distintas industrias y sectores económicos (Bessarabov & Millet, 2018) .....	5
Tabla 2 Versatilidad del hidrógeno en comparación con combustibles fósiles, tomada de (Veziroglu & Barbir, 1992) .....	6
Tabla 3 Aprovechamiento del hidrógeno, de acuerdo a los diferentes procesos de conversión y aprovechamiento energético, datos de (Veziroglu & Barbir, 1992) . .....	6
Tabla 4: Tipos de hidrógeno, de acuerdo con su método de producción (Deutsche gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2021). *El H <sub>2</sub> negro también puede ser designado con el color marrón. ....	12
Tabla 5 Áreas clave para las políticas necesarias para el desarrollo apropiado del <b>H<sub>2</sub></b> en la transición energética, elaborada con información de (IEA, 2022) y (IEA, 2019). ....	16
Tabla 6 Fases de transición para la adopción de hidrógeno verde en la UE, 2020-2050, hecha con datos de (Comisión Europea, 2020). ....	18
Tabla 7 Estrategias a seguir en EEUU para la adopción de hidrógeno limpio (Department of Energy, 2023). *El objetivo de la estrategia “1 1 1” indica que el costo de 1 kg de H <sub>2</sub> tendrá un costo de 1 USD en 1 década. ....	19
Tabla 8 Fases de transición energética para EEUU en corto, mediano y largo plazo (Department of Energy, 2023).....	20
Tabla 9 Grupos de trabajo de ISO/TC 197 para la estandarización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, medición y uso del hidrógeno, tomado de (ISO, 1990). ....	21
Tabla 10 Iniciativas presentadas en la LXV Legislatura de la Cámara de Diputados y el Senado de la República acerca de hidrógeno, tomada de (Aguirre Quezada, 2022).....	23
Tabla 11 Rendimientos de distintos hidrocarburos por procesos SR y POX, tomada de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).....	30
Tabla 12 Variaciones del tipo de electrólisis de acuerdo con el tipo de electrolito usado en la celda, con información de (Bessarabov & Millet, 2018).....	32
Tabla 13 Resumen comparativo de los distintos tipos de celdas disponibles, con datos de (Bessarabov & Millet, 2018) y (Ahmed, y otros, 2020) .....	37
Tabla 14 Tipos de bioenergía disponibles según una clasificación de su eficiencia energética.....	45

Tabla 15 Descripción de un ciclo binario orgánico ideal. ....	58
Tabla 16 Propiedades estándar de la reacción de electrólisis del agua .....	63
Tabla 17 Propiedades de la reacción de electrólisis del agua en función de la temperatura de la reacción.....	67
Tabla 18 Simbología utilizada en el diagrama de flujo de proceso en el CBM IIDEA100 .....	79
Tabla 19 Condiciones de operación de los distintos equipos del CBM IIDEA100 .	80
Tabla 20 Parámetros de la energía eléctrica generada por el CBM IIDEA100.....	81
Tabla 21 Resumen del análisis del CBM IIDEA100.....	84
Tabla 22 Rango de operación propuesto para el CBM IIDEA100.....	87
Tabla 23 Resultados del análisis económico del CBM IIDEA100 .....	90
Tabla 24 Costos nivelados de generación para diferentes alternativas renovables y el costo de 24 horas de generación .....	91
Tabla 25 Precios de la producción, en USD, diaria de H2 .....	92
Tabla 26 Capacidad instalada de la CFE y del resto de los permisionarios contemplando las adiciones hasta 2036 (MW) ajustado por factor de planta, tomada de (IMCO, 2022).....	105
Tabla 27 Evolución de la energía producida (GWh) 2017-2022 por tipo de energía (Centro Nacional de Control de Energía, 2023).....	106
Tabla 28 Lista de fluidos de trabajo y sus propiedades (Macchi, 2017) .....	109

## NOMENCLATURA

AC	Corriente alterna
AEM	Membrana de Intercambio Aniónico
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas de Materiales
ATR	Reformado de Hidrocarburos Autotérmico
BOL	Inicio de Vida Útil
CBM 100	Ciclo Binario Modular de 100 kW
CCUS	Almacenamiento y Utilización de Carbón Capturado
CD	Corriente Directa
CICY	Centro de Investigación Científica de Yucatán
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	Hidrocarburo Genérico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
COP27	27° Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2022
CPEUM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
CPOX	Reformado de Hidrocarburos por Oxidación Parcial Catalítica
DOF	Diario Oficial de la Federación
EEUU	Estados Unidos de América

ETPUTCL	Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles Limpios
F	Constante de Faraday
$G_R^0$	Energía libre Gibbs estándar de la reacción
G20	Cumbre de las 20 economías más grandes del mundo
GW	Giga Watts
H <sub>2</sub>	Hidrógeno diatómico
HER	Reacción de Evolución del Hidrógeno
I&D	Investigación y Desarrollo
IC	Combustión interna
IEA	Agencia Internacional de Energía
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
IPN	Instituto Politécnico Nacional
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
ISO	Organización Internacional de Estándares
KPI	Indicador de rendimiento clave
LIE	Ley de la Industria Eléctrica
MT	Mega toneladas, millones de toneladas
NOM	Norma Oficial Mexicana
OER	Reacción de Evolución del Oxígeno

ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y PROPIETARIA, QUE NO DEBE SER PUBLICADA Y DIVULGADA A OTROS, REPRODUCIDA Y/O UTILIZADA PARA OTRO PROPÓSITO QUE NO SEA PARA EL CUAL FUE ELABORADO, SIN PERMISO PREVIO ESCRITO POR GRUPO IIDEA O EL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM”.

ORC	Ciclo Orgánico Rankine
PAMRNT	Programas de Ampliación y Modernización de la RNT
PEM	Membrana de Intercambio Protónico
PETE	Programa Especial de Transición Energética
PFSA	Ácido Perfluorsulfónico
pH	Potencial de Hidrógeno
PIIRCE	Programas Indicativos para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas
POX	Reformado de Hidrocarburos por Oxidación Parcial
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
PROY-NOM	Proyecto de Norma Oficial Mexicana
$Q$	Calor
$R_{eq}$	Resistencia Eléctrica Equivalente
RNT	Red Nacional de Transmisión
RPC	República Popular China
SENER	Secretaría de Energía
$\Delta S_R^0$	Entropía estándar de la reacción
SMAC	Secretaria de Medio Ambiente de Coahuila
SOEC	Celdas con Electrolisis con Óxido Sólido
SPE	Electrolito de Polímero Sólido

SR	Reformado de Hidrocarburos con Vapor
$T^0$	Temperatura estándar (25°C)
TC 197	Comité Técnico 197 de ISO
UE	Unión Europea
USD	Dólares estadounidenses
$V_{rev}$	Diferencia de Potencial Reversible
$V_{SP}$	Sobrepotencial

## RESÚMEN

El hidrógeno, gracias al desarrollo tecnológico propiciado por las iniciativas globales de descarbonización y mitigación de gases de efecto invernadero, comienza a atraer la atención de gobiernos y empresas privadas para producirlo con energías renovables. Al utilizar energías renovables se habla de un tipo de hidrógeno particular, verde. Dicho color es asociado, como una convención mundialmente aceptada, a las energías renovables que producen electricidad dedicada para un proceso electrolítico; dichos procesos productores de hidrógeno tienen múltiples alternativas para su unidad base (celda electrolítica), principalmente modificando la composición química del electrolito. Las aplicaciones del hidrógeno resultante tienen múltiples industrias con un posible interés: química, petroquímica, metalúrgica, aeronáutica, alimenticia, transporte, cementera, siderúrgica, energética, entre otras.

Entre las filas de las energías renovables, para este trabajo, tiene una importancia particular la energía geotérmica y el factor térmico que ofrece adicional a la generación eléctrica, el cual influye positivamente en la producción de hidrógeno verde, disminuyendo el consumo energético un 3%, aproximadamente. Sin embargo, la geotermia se presenta en diferentes niveles de potencial: bajo, medio y alto. Mientras que los potenciales altos se utilizan en plantas convencionales de contrapresión o condensación, los potenciales bajos y medios pueden aprovecharse con Ciclos Rankine Orgánicos (ORC)

De la misma manera que la geotermia ofrece dos alternativas para su implementación, calor directo y/o electricidad, los ORC pueden utilizarse con geotermia o con remanentes térmicos industriales. Esto provoca que la producción de hidrógeno se vuelva más versátil y se pueda producir in-situ dentro de los parques industriales, afectando industrias como lo podrían ser la siderúrgica y cementera, conocidas por sus altos consumos de combustibles en operaciones de continuidad anual.

## **OBJETIVO GENERAL**

El objetivo de esta tesis es proponer un modelo matemático que permita predecir la producción de H<sub>2</sub> dentro de un sistema de electrólisis PEM energizado por un ciclo Rankine orgánico en un caso de estudio. Dicho modelo matemático estará sustentado en información accesible dentro de la literatura disponible, para poder determinar el efecto que tiene la temperatura de reacción en la producción de H<sub>2</sub> en el modelo matemático. Así, se podrá determinar si la implementación de un sistema de electrólisis obtiene ventajas al estar conectado a una fuente geotérmica.

## OBJETIVOS PARTICULARES

Capítulo	Objetivo Particular
Capítulo 1 – Producción de hidrógeno	Introducir el concepto de hidrógeno como una fuente energética que ya ha tenido un desarrollo previo a nivel industrial. Además de indicar la perspectiva de la demanda, el marco técnico, ambiental y normativo que lo rige en México.
Capítulo 2 – Matriz energética y la participación del hidrógeno	Indicar las distintas fuentes de energía renovables que pueden energizar un sistema de electrólisis para la producción de hidrógeno verde. Analizar las energías solar, eólica, hidráulica y geotérmica, haciendo énfasis en la energía geotérmica de baja entalpía y los ORC; así como los requerimientos técnicos necesarios para equipar y operar un ORC, de tal forma que se pueda aprovechar el calor de la geotermia y la electricidad producida para producir H <sub>2</sub> .
Capítulo 3 – Mecanismos para la producción del hidrógeno verde	Ahondar en los requerimientos técnicos del proceso y requerimientos energéticos; así como el abastecimiento eléctrico y calorífico mediante fuentes como los ciclos binarios.
Capítulo 4 – Caso de estudio para un CBM de 100 kW operado con energía geotérmica de baja entalpía	Diseñar y analizar el caso de estudio particular de un ORC de 100 kW, energizado por energía geotérmica de baja entalpía, destinado para la producción de hidrógeno verde. Considerando aspectos técnicos y económicos mediante un análisis de viabilidad; además de comparar contra propuestas alternativas con el fin de justificar la propuesta.

## 1 ESTADO DEL ARTE DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

La obtención de energía de combustibles fósiles ha sido una práctica común para una gran cantidad de empresas e industrias desde que se empezó a usar el carbón como combustible. En la actualidad, el uso de energías renovables, que sustituyen el uso de combustibles fósiles para la obtención de energía, comienzan a tomar relevancia gracias a los objetivos de descarbonización propuestos tanto por gobiernos como por empresas privadas y públicas, es el uso de energías renovables que sustituyan el uso de combustibles fósiles para la obtención de energía. Por tal motivo, en el presente capítulo se introducirá el concepto del hidrógeno como una fuente energética con desarrollo previo a nivel industrial. Además de indicar la perspectiva de la demanda, su marco técnico, ambiental y normativo que lo rige en México.

### 1.1 DESCRIPCIÓN

Una de las alternativas que se han explorado con anterioridad, a lo largo de los siglos XX y XXI, para aplicaciones industriales, mineras, domésticas y de transporte es el hidrógeno (Aguirre Quezada, 2022).

El hidrógeno es el elemento que se encuentra en mayor abundancia en el Universo, siendo que conforma el 90% de su masa (Fernández-Bolaños Badía, 2005); también es el más ligero de todos los elementos puros, compuesto meramente por un protón y un electrón. En su estado puro y bajo condiciones estándar es un gas incoloro, inodoro, insípido y no tóxico. A pesar de ser el elemento de composición más pequeña, no lo hace simple bajo ningún punto de vista, porque es un elemento altamente reactivo, ya que en su forma monoatómica es inestable y necesita formar compuestos con otros elementos para estabilizarse. Por esto es más sencillo encontrarlo en distintos compuestos que en su forma pura. Estos compuestos pueden variar radicalmente, tanto en su trascendencia para la vida diaria y el desarrollo tecnológico humano; entre ellos están: el agua ( $H_2O$ ), las distintas familias de los hidrocarburos ( $C_nH_m$ ) y la molécula diatómica de hidrógeno ( $H_2$ ). Para que el hidrógeno sea útil como un vector energético, debe de encontrarse en su forma diatómica. En dicho caso, sería incorrecto referirse a este como un elemento, siendo que pasa a ser una molécula. Por lo tanto, cada vez que se hable de hidrógeno en este trabajo se hace referencia a la molécula  $H_2$ .

### 1.2 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

Al hablar de hidrógeno se pueden mencionar aplicaciones que van más allá de la combustión del mismo. Las aplicaciones del hidrógeno abarcan una gran gama de aplicaciones e industrias, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1: Usos del H<sub>2</sub> en distintas industrias y sectores económicos (Bessarabov & Millet, 2018)**

<b>USOS DEL H<sub>2</sub> EN DISTINTAS INDUSTRIAS</b>	
INDUSTRIA	APLICACIÓN
<b>QUÍMICA</b>	Síntesis de amonía
	Producción de ácido clorhídrico
	Producción de metanol
	Mezclas de H <sub>2</sub> con combustibles gaseosos
<b>AERONÁUTICA</b>	Globos de gran altitud
	Combustible
<b>PETROQUÍMICA Y REFINACIÓN</b>	Producción de compuestos químicos orgánicos
	Hidroformilación
	Hidrocracking
	Desulfuración
	Reacciones de hidrogenización
<b>ALIMENTICIA</b>	Hidrogenización homogénea de aceites y de grasas
<b>METALURGIA Y PROCESOS</b>	Reducciones de sales metálicas
	Nitruración y carbonización de superficies sinterizadas
	Fabricación de vidrio para fibra óptica
	Soldadura atómica de hidrógeno
<b>TRANSPORTE Y ENERGÍA</b>	Fuente energética de cero emisiones, celdas de combustible
	Almacenamiento energético

De esta manera se puede identificar al H<sub>2</sub> como un vector energético de gran versatilidad y flexibilidad, ya que no depende de su combustión para ser de utilidad, tal como se muestra en la Tabla 3. Sin embargo, en este momento sólo son de interés, para esta tesis, los usos en los que el hidrógeno es un recurso con la posibilidad de ser aprovechado con fines de producción energética.

### **1.3 VERSATILIDAD DE APROVECHAMIENTO COMO COMBUSTIBLE**

Para producir energía eléctrica se debe de transformar y aprovechar la energía química contenida en el combustible mediante un proceso de combustión. En caso de que un combustible pueda ser convertido en distintas formas de energía, éste se vuelve más versátil. Tal es el caso del hidrógeno. se muestran en la Tabla 2 las posibilidades de aprovechamiento

que posee.

**Tabla 2 Versatilidad del hidrógeno en comparación con combustibles fósiles, tomada de (Veziroglu & Barbir, 1992)**

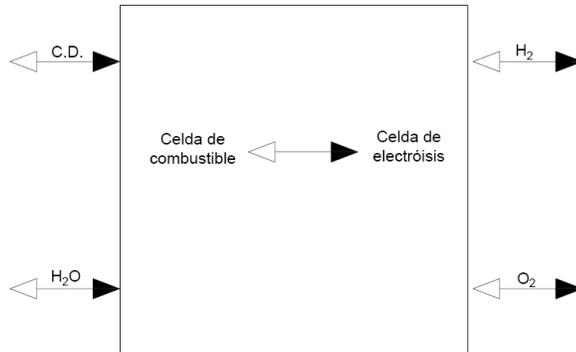
PROCESO	H <sub>2</sub>	COMB. FÓSILES
Combustión con flama	Si	Si
Producción directa de vapor	Si	No
Combustión catalítica	Si	No
Conversión química	Si	No
Conversión electroquímica	Si	No

La versatilidad del H<sub>2</sub> no está limitada a sus aplicaciones por sectores industriales, ésta trasciende al mismo método de aprovechamiento que se desee utilizar. Por lo tanto, usar hidrógeno como un vector energético implica que es posible la adopción de cualquiera de los cinco métodos de conversión mencionados en la Tabla 2. Los procesos de conversión son descritos en la Tabla 3.

**Tabla 3 Aprovechamiento del hidrógeno, de acuerdo a los diferentes procesos de conversión y aprovechamiento energético, datos de (Veziroglu & Barbir, 1992) .**

PROCESO	REACCIÓN QUÍMICA	USOS
Combustión	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + Calor$	Motores IC Motores diésel Turbinas de gas Cocina
Producción directa de vapor	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + nH_2O \rightarrow (n+1)H_2O_{(g)}$	Turbinas de vapor Vapor industrial Vapor para calefacción
Combustión catalítica	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + Catalizador \rightarrow H_2O + Calor$	Cocina Calentamiento de agua Refrigeración
Conversión química	$mM + nH_2 \leftrightarrow MnH_{2n} + Calor$ $M_mH_{2n} + Calor \rightarrow mM + nH_2$	Almacenamiento H <sub>2</sub> Purificación H <sub>2</sub> Refrigeración Generación eléctrica
Conversión electroquímica	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + C.D. + Calor$	Generación eléctrica

Una de las ventajas más notables del hidrógeno como fuente de generación de la energía eléctrica es que dentro de las celdas de combustible, en las que se convierte directamente el hidrógeno en electricidad de corriente directa (CD), no se tiene la limitación energética del ciclo Carnot, ya que las celdas de combustibles, en algunos casos, tienen un proceso reversible, como se muestra en la Figura 1 y pueden generar hidrógeno o energía eléctrica como producto final (Veziroglu & Barbir, 1992).



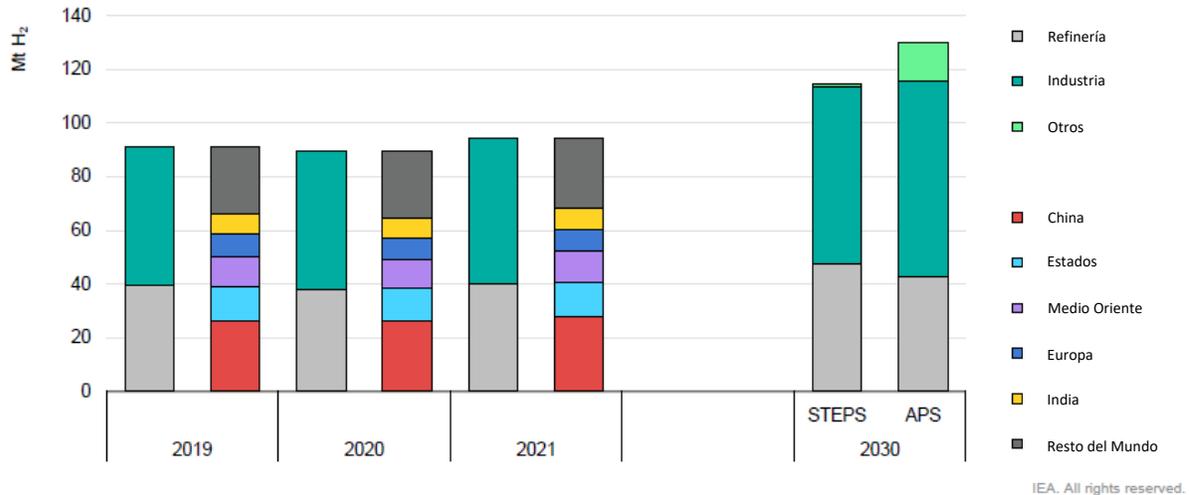
**Figura 1 Diagrama de la reversibilidad del proceso de una celda de combustible**

## **1.4 PERSPECTIVA DE LA DEMANDA Y PRODUCCIÓN DE H<sub>2</sub> HASTA 2030**

Hasta el momento se han identificado diversos sectores industriales en los que el H<sub>2</sub> ha tenido una gran aceptación con propósitos diversos, como se señaló en la Tabla 1. Por esto se vuelve importante comprender la demanda y la producción de este vector energético a nivel mundial y local. Desde esta óptica se analizará la demanda y la producción, que son aspectos complementarios.

### **1.4.1 DEMANDA DE H<sub>2</sub> HASTA 2030**

La demanda de H<sub>2</sub> está ascendiendo, de acuerdo con la IEA en 2022, a 94 MT (IEA, 2022). En su mayor parte el incremento de la demanda fue destinado para aplicaciones tradicionales, Figura 2. Pero un 40% de dicho incremento fue para investigación y desarrollo, aproximadamente 40,000 toneladas (IEA, 2022). Aunque, en comparación, las cifras no parecen prometedoras para proyectos de investigación, se han generado proyectos en sectores como el siderúrgico y transporte; siendo que, para el último mencionado, se han producidos proyectos piloto para usar H<sub>2</sub> y sus derivados (IEA, 2022). Todo esto ha posicionado al H<sub>2</sub> como un vector energético versátil y digno de asegurar, motivo por el cual muchas compañías han asegurado un lugar estable dentro de la cadena de valor (IEA, 2022) como: los conjuntos costeros industriales; la infraestructura existente de gas; flotas, carga y corredores; y, rutas de envío (IEA, 2019).



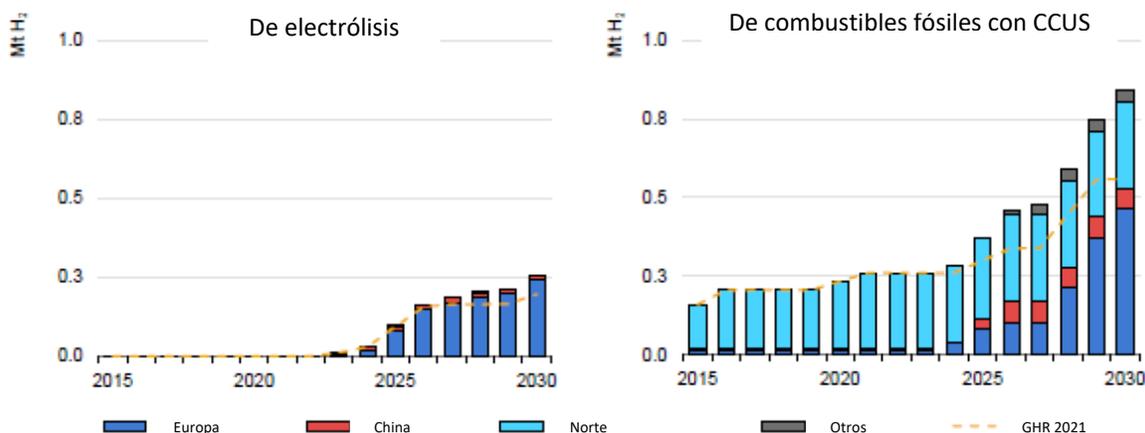
**Figura 2 Demanda de hidrógeno por sector y por región en las políticas y acuerdos, 2019-2030 (IEA, 2022)**

A pesar de que la demanda de  $H_2$  es alta, el impacto ambiental que se pudiera suponer por su uso, no es significativo. La realidad es que, la demanda fue cubierta por  $H_2$  de origen fósil (IEA, 2022). Mientras que, en lo que respecta a  $H_2$  de bajas emisiones, sólo se produjo 1 MT (IEA, 2022). Cabe destacar que dicha producción de  $H_2$  de bajas emisiones fue con métodos de almacenamiento y utilización de carbono capturado (CCUS, por sus siglas en inglés) en su mayor parte. Por lo tanto, ese  $H_2$  de bajas emisiones fue generado, de cualquier forma, usando combustibles fósiles.

Para que existiera un efecto positivo, en materia de producción de  $H_2$ , se debe de producir por medio de electrólisis. Ya se mencionaron los aportes del  $H_2$  de bajas emisiones contaminantes y en comparación con la producción con uso de combustibles fósiles o con CCUS. Pero, de acuerdo con estimados de la Asociación Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) (IEA, 2022), en caso de que todos los proyectos actuales, a nivel mundial, se podría conseguir una capacidad de 130-240 GW para el 2030. Dicho rango de capacidad hipotético que se plantea, ofrece la comparativa entre el límite inferior y superior, igualándolos con la capacidad instalada renovable en Alemania y Latinoamérica respectivamente. Con la electrólisis se tiene una posibilidad de producción de  $H_2$  que no sólo sea de bajas emisiones, sino que carezca por completo de ellas. Claro que está la electricidad usada en el proceso debe de ser producida por fuentes de energéticas limpias.

Se puede tomar como ejemplo de la tendencia tecnológica la producción de  $H_2$  que se prevé a nivel mundial para efectos de refinamiento, tanto por electrólisis como por el uso de combustibles fósiles con CCUS, se muestra a continuación en la Figura 3.

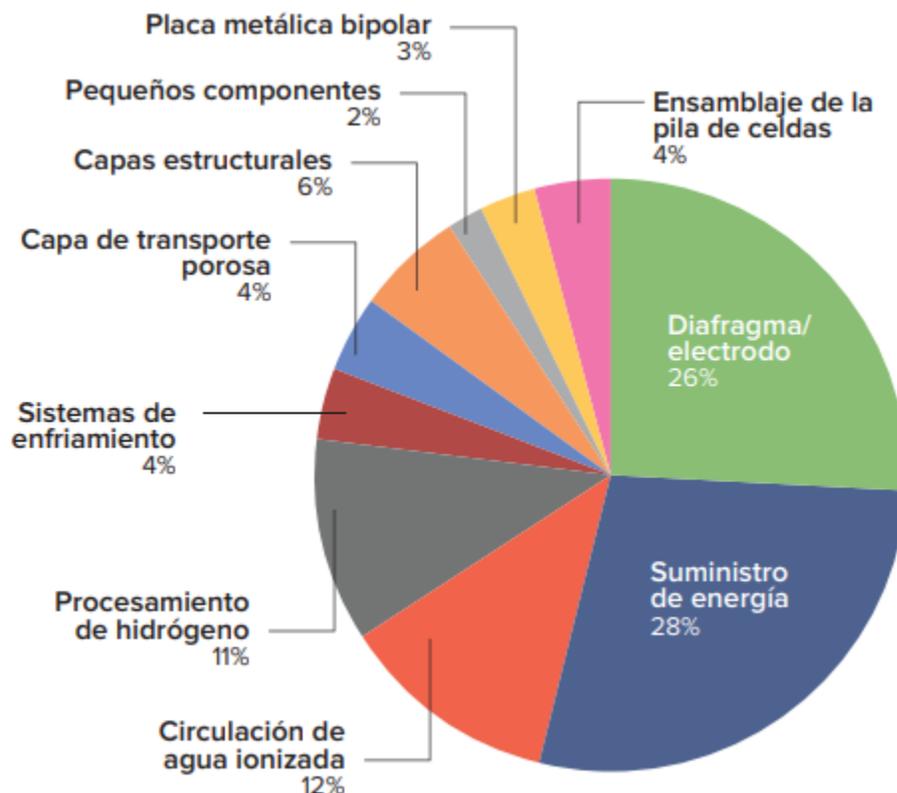
PRODUCCIÓN PLANEADA DE HIDRÓGENO DE BAJAS EMISIONES PARA REFINAMIENTO POR TECNOLOGÍA Y REGIÓN, 2018-2030



**Figura 3 Producción planeada de hidrógeno de bajas emisiones para refinamiento, por tecnología y región, 2018-2030 (IEA, 2022).**

Como se había mencionado en la Tabla 1, el hidrógeno tiene múltiples aplicaciones, en este caso se está mostrando la tendencia existente dentro de la aplicación de refinamiento de derivados del petróleo. Una industria que alcanzó una demanda 40 MT de hidrógeno en 2018, sin señales de disminución; sin embargo, se ve que la demanda será cumplida por hidrógeno proveniente de los mismos combustibles fósiles, con la alteración de CCUS. Mientras que la electrólisis toma un segundo papel dentro de esta industria, apenas llegando a las 0.3 MT de hidrógeno, siendo que la electrólisis es una forma viable de producir hidrógeno con un impacto ambiental neutro.

Si bien, la electrólisis es una opción alentadora con la posibilidad de entregar resultados benéficos, no ha sido explotada a gran escala. Ya que la mayoría de los proyectos de producción de hidrógeno trabajan con CCUS. Mientras que la manufactura de electrolizadores en 2022 indicaba una capacidad de 8 GW/año y con la posibilidad de llegar a 60  $\frac{GW}{año}$  en 2030 (IEA, 2022). Existe documentación que señala la compra-venta de un electrolizador PEM de 1.25 MW en 2022 con un precio de 2.6 millones de dólares, lo que equivale a  $\$2.08 \frac{USD}{kW}$  (Embajada de Dinamarca, 2023). Mientras que los costos de producción más bajos identificados, para unidades de electrólisis, son de  $2.53 \frac{€}{kg}$  para 50 MW de energía eólica y 72 MW de electrólisis (Hofrichter, Rank, Heberl, & Sterner, 2022). Considerando que los precios desglosados de un electrolizador de 1 MW están en la Figura 4, que muestra los porcentajes correspondientes de cada componente requerido dentro de un electrolizador.



**Figura 4 Costo desglosado por componentes y costo de inversión de un electrolizador PEM de 1 MW (Embajada de Dinamarca, 2023).**

Desgraciadamente, muchos proyectos de  $H_2$  de bajas emisiones no llegan a las fases finales en programas de inversión. Es decir que todos los proyectos, con los que se pudiera conseguir la capacidad de 134-240 GW para 2030, sólo el 4% conseguiría la inversión de capital necesaria para su realización (IEA, 2022). Esta falta de inversión podría ser, como lo identifica la IEA, por razones como: Incertidumbre acerca de la demanda de equipos de esta naturaleza, falta de un marco normativo que sea aplicable y la carencia de una infraestructura para el transporte y distribución del  $H_2$ .

#### 1.4.2 PRODUCCIÓN DE $H_2$ HASTA 2030

En el apartado anterior se introdujo la noción del origen del hidrógeno necesario para cumplir la demanda existente, ahora se profundizará en ese aspecto.

Se puede visualizar, al menos en un sector muy particular que es la refinación de combustibles fósiles, que un gran porcentaje del hidrógeno requerido es producto de combustibles fósiles con CCUS, Figura 2. Mientras que el hidrógeno con posibilidades de generar un impacto ambiental neutro, por las razones indicadas en el apartado 1.4.1 DEMANDA DE  $H_2$  HASTA 2030, tiene un porcentaje mínimo y casi negligible en comparación. Esta tendencia es similar en el resto de aplicaciones.

Si la producción de hidrógeno en 2021 fue de 94 MT, producción que está asociada

a la emisión de más de 900 MT de CO<sub>2</sub> (IEA, 2022) el 62% de dicha producción fue generada con gas natural, sin la modificación de CCUS. Mientras que la producción de H<sub>2</sub> de bajas emisiones sólo produjo 1 MT, representando sólo el 1.06% de las 94 MT demandadas en 2021 nivel mundial.

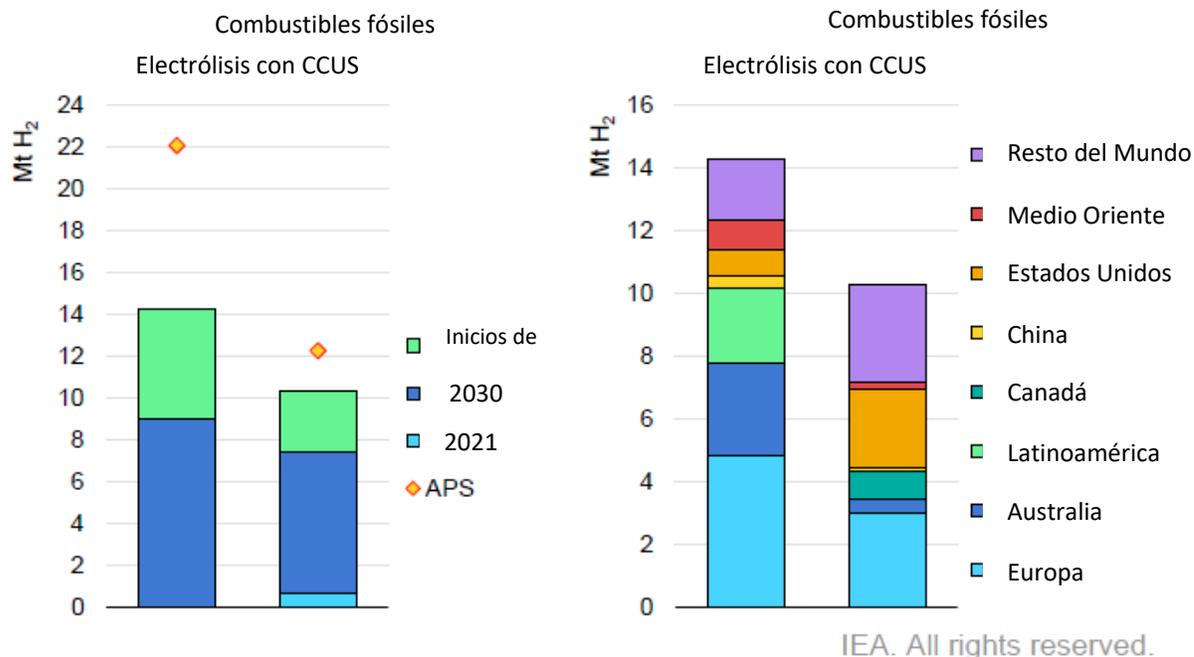


Figura 5 Producción de H<sub>2</sub> de bajas emisiones para 2020 y 2030 en distintas regiones, divididas por origen (IEA, 2022).

El caso de México, existe una gran variedad de proyectos de desarrollo tecnológico alrededor de la producción de H<sub>2</sub>. Estos proyectos son por parte de las instituciones como el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Centro de investigación Científica de Yucatán (CICY).

### 1.5 MARCO AMBIENTAL

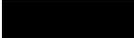
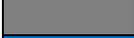
El uso de un recurso energético como el hidrógeno puede caer en una distintiva ambigüedad, ya que su aprovechamiento suele indicar un impacto neutro, lo que lo hace llamativo en movimientos en contra del cambio climático. Al menos en aspectos concernientes a cuestiones energéticas, su uso es limpio; sin embargo, el uso que se le dé al H<sub>2</sub> y su método de producción son dos materias completamente distintas y pudieran no compartir las mismas bondades ambientales, como se ha explicado hasta ahora. Es por esto que se debe de hacer la aclaración entre las distintas formas de producir hidrógeno y las consecuencias asociadas a cada una de ellas. De tal forma, para identificar el origen que tiene el H<sub>2</sub> se ha clasificado por color a cada uno de los métodos de producción de hidrógeno, se identifican en el apartado 1.5.1 TIPOS DE HIDROGENO PRODUCIDOS.

### 1.5.1 TIPOS DE HIDROGENO PRODUCIDOS

La clasificación del hidrógeno, en el ámbito energético, se da por colores. Estos colores identifican el método de formación de la molécula  $H_2$ . Las posibilidades se muestran a continuación en la Tabla 4:

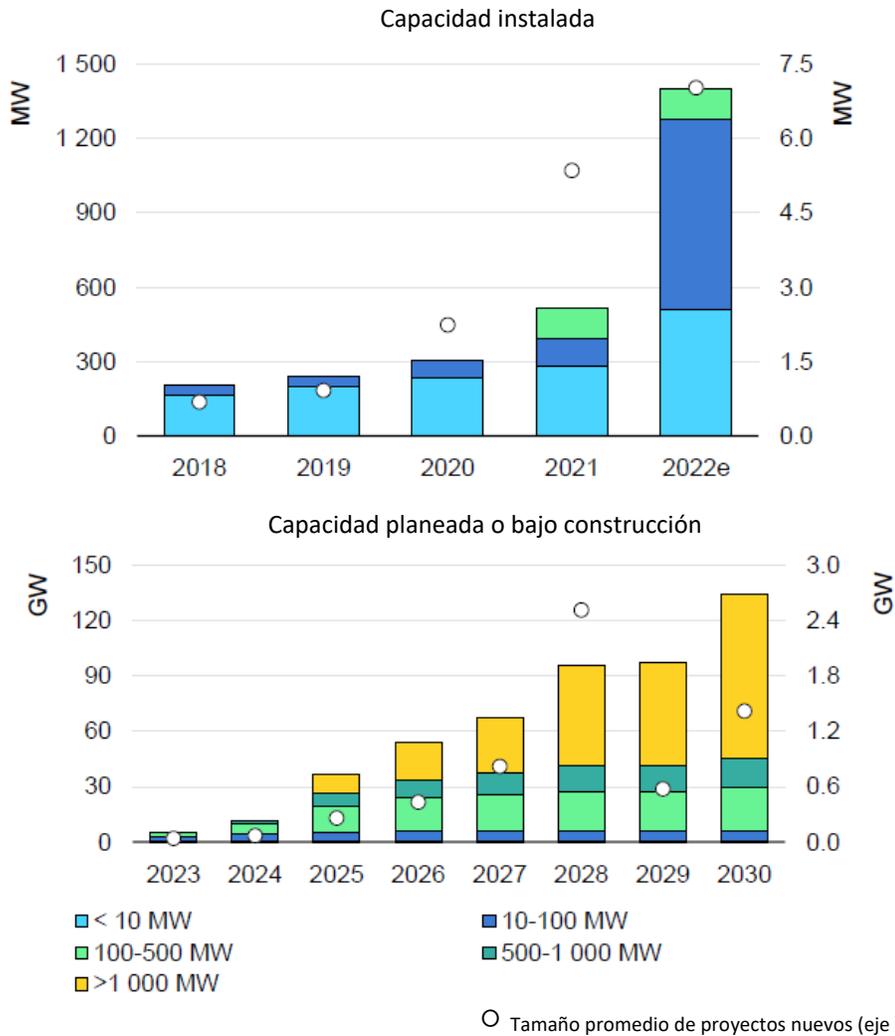
**Tabla 4: Tipos de hidrógeno, de acuerdo con su método de producción (Deutsche gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2021).**

**\*El  $H_2$  negro también puede ser designado con el color marrón.**

<b>CLASIFICACIÓN DEL <math>H_2</math></b>			
<b>COLOR</b>	<b>DESIGNACIÓN</b>	<b>ENERGÉTICO USADO</b>	<b>MÉTODO DE PRODUCCIÓN</b>
	NEGRO*	Carbón	Gasificación
	GRIS	Hidrocarburos	Reformado de $CO_2$ con captura de $CO_2$
	AZUL	Hidrocarburos	Reformado de $CO_2$ con captura de $CO_2$
	VERDE	Energías limpias	Electrólisis
	TURQUESA	Hidrocarburos	Pirólisis
	ROSA	Uranio/Plutonio	Electrólisis en centrales nucleares
	AMARILLO	Energía solar	Electrólisis
	BLANCO	N/A	Ocurrencia natural

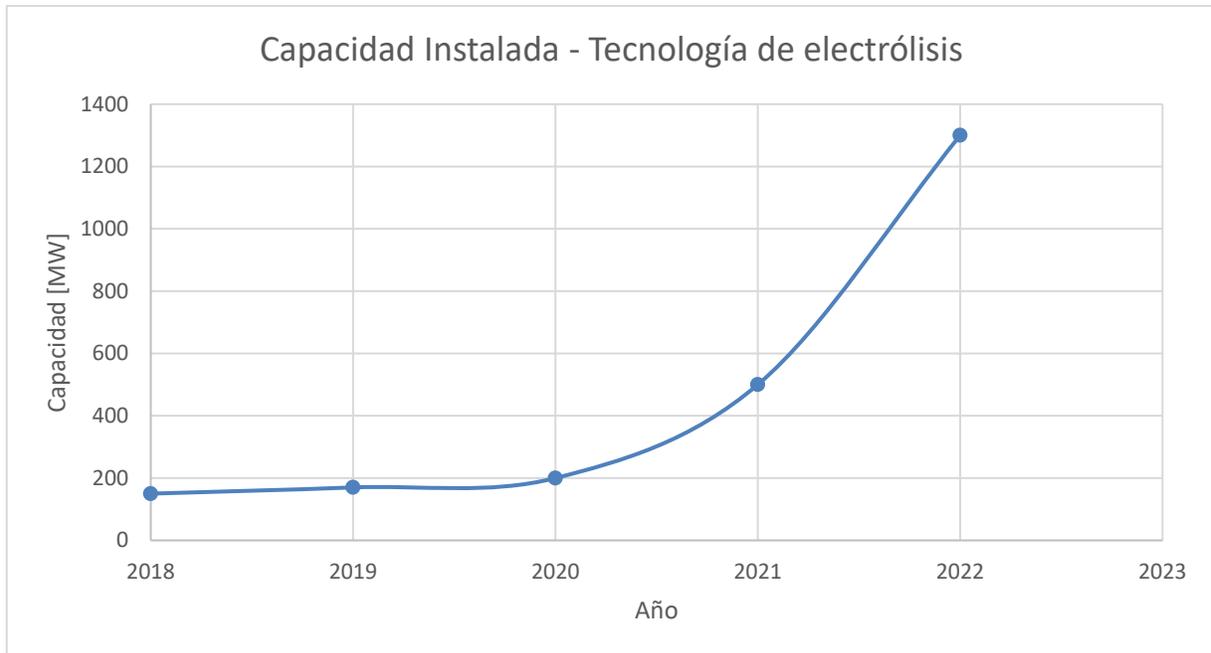
Los métodos que no tienen emisiones contaminantes al ambiente son los que están identificados bajo el método de electrólisis, siempre y cuando se utilice una energía renovable, limpia, en dicho método. Los aspectos técnicos de la electrólisis serán cubiertos más adelante en el apartado 1.7, pero en general es una reacción electro-química que disocia al hidrógeno del oxígeno en las moléculas de agua. Entones, los colores que se pueden asociar a bajas emisiones contaminantes son: Verde, Rosa, Amarillo y Blanco.

Si bien, todos los tipos de hidrógeno de bajas emisiones deben de explorarse y fomentarse, es el interés de este documento sólo el hidrógeno verde, proveniente de procesos de electrólisis energizados con energías limpias. La producción de  $H_2$  asociada a electrólisis es de aproximadamente del 1% a nivel global; sin embargo, se observa el crecimiento paulatino de la capacidad instalada y la capacidad planeada en la Figura 6.



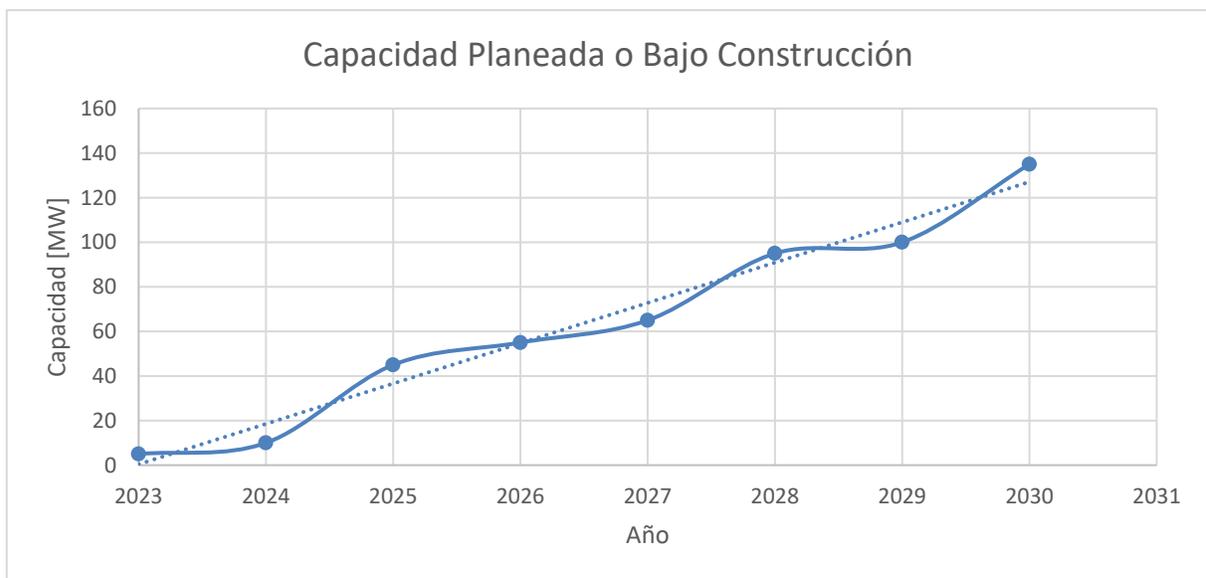
**Figura 6 Capacidad instalada y planeada a nivel global de electrolizadores, 2018-2030 (IEA, 2022)**

La capacidad instalada, mostrada en la Figura 6, muestra el crecimiento esperado de la tecnología para electrólisis a nivel mundial, aumentando notablemente de acuerdo con la proximidad del 2030. El crecimiento tiene una razón de crecimiento variable en la capacidad instalada, pero la capacidad planeada tiene un crecimiento constante a una razón de  $18 \frac{MW}{año}$ , se muestra a continuación en la -Figura 7 y Figura 8.



**Figura 7 Comportamiento de la capacidad instalada, 2018-2030, de la tecnología para electrólisis a nivel mundial. Hecha con datos de (IEA, 2022).**

En la Figura 7 se puede observar un crecimiento dramático de la capacidad instalada. Tanto así que la capacidad instalada pasa de ser 500 MW a más de 1 GW de capacidad. Esto se da por la apertura de múltiples proyectos que culminaban sus procedimientos preparativos en ese año o que coincidían en su inicio. Un ejemplo de dichos proyectos es un electrolizador de gran escala (150 MW) en China, que funciona a partir de una granja de paneles fotovoltaicos, para producir metanol (IEA, 2022).



**Figura 8 Comportamiento de la capacidad planeada o bajo construcción, 2023-2030, de la tecnología para electrólisis a nivel mundial. Hecha con datos de (IEA, 2022).**

El crecimiento de las capacidades, tanto instalada como planeada y bajo construcción, indica una alternativa para los planes contra el cambio climático.

Pero la construcción de estos proyectos debe de estar regulada dentro de un marco legal comprensivo, ya que eso era uno de los motivos que impedían a los mismos llegar a etapas de financiamiento. Es por eso que la comunidad internacional, así como cada país interesado, ha formulado sus propia normativa y estrategia nacional para implementar el hidrógeno como una fuente energética.

## **1.6 MARCO ESTRATÉGICO Y NORMATIVO**

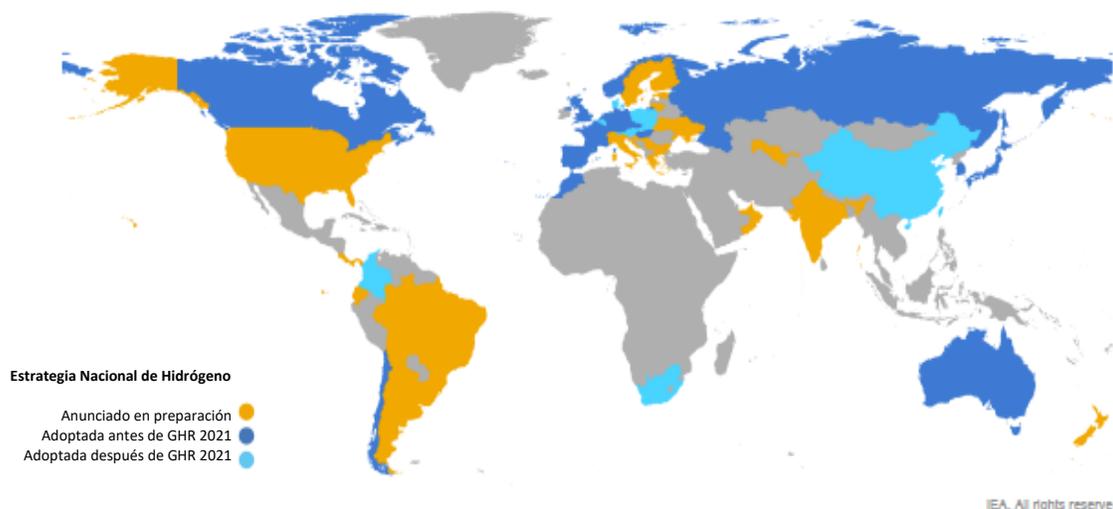
Como se ha explicado hasta este momento, el hidrógeno se ha vuelto un elemento capaz de tomar un papel principal en el escenario global, en distintas industrias y se espera que el crecimiento de su demanda, así como su producción, aumenten. Es por eso que muchas instancias gubernamentales y asociaciones diversas han generado documentos legales y normativos que indican las posiciones de los organismos respecto al hidrógeno.

### **1.6.1 MUNDIAL**

A nivel mundial, no se puede entender a ningún país de forma individual. Porque la misma globalización, que caracteriza a este siglo, lo hace imposible; sin embargo, se puede hablar de conglomerados y foros. Ya que se han generado múltiples interconexiones de manera simultánea entre los miembros de la sociedad internacional. Un ejemplo de estos foros es el G20, enfocado a la cooperación económica internacional. Está compuesto por países que producen el 75% del comercio mundial, 85% del PIB mundial (G20, 2023) y el 80% de las emisiones globales (ONU, 2022). Dentro del G20 se emiten recomendaciones que no son legalmente coercitivas para ningún miembro; sin embargo, esta dentro de los intereses de los miembros seguirlas para seguir siendo parte de la comunidad internacional y algunas facilidades que presenta dicho estatus. Con esta plataforma a la que tiene acceso dicha cumbre de naciones, se puede tener una idea general de la influencia que reciben los líderes de los países miembros en su toma de decisiones económicas.

Para el G20 de 2019, con sede en Osaka, Japón, se comisionó un reporte de la IEA que marca un hito histórico en el desarrollo del hidrógeno como vector energético (IEA, 2019). Por lo que se ha explicado de la naturaleza del G20 en la toma de decisiones de sus miembros, se puede inferir que esos miembros han sido informados de los hallazgos reportados. Las recomendaciones indicadas están dirigidas a: establecer objetivos y políticas a largo plazo; apoyar la creación de demanda; mitigar los riesgos de inversión; promover la investigación y el desarrollo con proyectos de demostración estratégicos y difusión del conocimiento; y, armonizar los estándares para retirar barreras (IEA, 2019).

En la Figura 9, que corresponde a datos recopilados en 2022, los países que tienen una estrategia nacional de hidrógeno, están divididos de acuerdo con el momento de su adopción. Para finales del año señalado, había 25 países, además de la Unión Europea, con estrategias anunciadas para el aprovechamiento de  $H_2$  como un vector energético limpio.



**Figura 9 Países con estrategias nacionales de hidrógeno en efecto o bajo planeación (IEA, 2022).**

Las áreas clave que indica la IEA para la adopción de un vector energético como el hidrógeno, a una velocidad aceptable para que se pueda utilizar como factor mitigante del cambio climático, son las siguientes

**Tabla 5 Áreas clave para las políticas necesarias para el desarrollo apropiado del  $H_2$  en la transición energética, elaborada con información de (IEA, 2022) y (IEA, 2019).**

ÁREAS	DESCRIPCIÓN
Objetivos y políticas a largo plazo	Las políticas energéticas deben de crearse con visión a futuro, para que los inversionistas mantengan su certeza del mercado de $H_2$ .
Apoyo de la demanda y producción	Estimular la creación de $H_2$ de bajas emisiones y promover su adopción como vector energético limpio.
Mitigar los riesgos de inversión	Facilitar el acceso al financiamiento, así como acelerar el despliegue de los proyectos actuales y futuros.
Promover I&D	Con proyectos demostrativos y el intercambio de conocimiento se disminuirán los costos de la tecnología y se incrementará su competitividad.
Establecer un marco regulatorio apropiado	La introducción de estándares, certificaciones y normas para regular las prácticas, eliminar barreras, facilitar el comercio, promover la inversión y cultivar la confianza del consumidor en el mercado del $H_2$ .

#### 1.6.1.1 REPÚBLICA POPULAR CHINA

La República Popular China (RPC) ha generado el “Plan a medio y largo plazo para el desarrollo de la industria de la energía del hidrógeno”, ya que en si su demanda representa un 30% del total mundial (IEA, 2022), que comprende un periodo de 16 años desde 2021 hasta 2035. En este documento, el gobierno chino identifica al  $H_2$  como un portador de gran

importancia para el uso a gran escala de forma eficiente de la energía renovable; así como sus ventajas de almacenamiento a gran escala y una parte clave para el desarrollo de las industrias del futuro (Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma, 2022). Los principios básicos del plan están dirigidos hacia una producción autosuficiente, autosostenible y a la vanguardia de la innovación en tecnología para la industria del  $H_2$  limpio y bajo en carbono.

#### 1.6.1.1.1 FASES DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Se espera que el  $H_2$ , dentro de la infraestructura china, experimente un desarrollo continuo y prudente, tal que se pueda desempeñar activamente como guía en la planificación e incentivo político (Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma, 2022). Entonces se desea que el hidrógeno tome la suficiente importancia dentro de la matriz energética para que se promuevan aplicaciones diversificadas en las industrias de: transporte, almacenamiento de energía, generación eléctrica y la industria en general.

Es por esto que, para 2025 se haya formado un entorno institucional y político que propicie el desarrollo de la industria del  $H_2$ . También se espera que el dominio de las tecnologías de fabricación y la capacidad de innovación, para que se pueda establecer una cadena de suministros y un sistema industrial más completos. La logística iniciaría con la producción de hidrógeno a partir de subproductos industriales y de energías renovables. Todo esto para conseguir una reducción de 1 a 2 MT de  $CO_2$  al año (Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma, 2022).

Después de 10 años de desarrollo, es decir en 2035, se espera un crecimiento (superando las 200,000 toneladas de  $H_2$  esperadas en 2025) y estabilización del sistema de innovación tecnológica de la industria de  $H_2$ . Para este punto se habrá conseguido un nivel de madurez tecnológica en las industrias que comenzaron a usar  $H_2$  en primer lugar.

Para que se puedan conseguir los objetivos, se tiene contemplado la aceleración en la innovación de celdas de combustible PEM. Por lo que el apoyo a la investigación y una vinculación con un nivel industrial está contemplado. Esto involucra la investigación de materiales, mejorar los KPI y la capacidad de producción por lotes, para que la fiabilidad, seguridad, estabilidad y durabilidad de las celdas PEM mejoren continuamente. Además de los avances en la investigación en celdas PEM se investigará el mecanismo científico del aprovechamiento del  $H_2$  como la difusión y combustión; las normas básicas de seguridad que son requeridas para la operación de sistemas enfocados en el aprovechamiento del  $H_2$ ; y, la creación de mano de obra capacitada y profesional para el manejo de la tecnología implicada en el ámbito del aprovechamiento del  $H_2$ .

El plan de la RPC se enfoca en toda la cadena de conocimiento, partiendo desde la investigación y el desarrollo, fomentando una vinculación posterior con la industria. Pero no se abordaría de la misma forma siempre, se espera que los recursos de la localidad sean aprovechados, lo que implica el uso de distintos tipos de  $H_2$ . Es decir, en parques industriales donde haya grandes cantidades de subproductos útiles para la reformación de hidrocarburos o gasificación de carbón, se usarían métodos de CCUS para conseguir hidrógeno azul. Mientras que en las zonas en las que dominen recursos naturales, tales como energía hidroeléctrica, eólica, solar, etc., se promovería la producción de hidrógeno verde a partir de agua tratada o agua de mar. En sí, el plan de la RPC tiene contemplado el uso de  $H_2$  azul,

verde, amarillo y rosa, de acuerdo con la clasificación de la Tabla 4. Pero no basta con sólo producir, también se toma en cuenta el almacenamiento y la distribución del hidrógeno; para tal efecto, se construirán proyectos centralizados en zonas de alta demanda de  $H_2$  que se conectarán a los usuarios mediante ductos de gas natural enriquecido con hidrógeno o de hidrógeno diatómico.

### 1.6.1.2 UNIÓN EUROPEA

La Unión Europea (UE) tiene una visión clara de cómo el hidrógeno puede ser una solución viable para la neutralidad climática de varios sectores importantes. Es por eso que se planea instalar electrolizadores para la producción de hidrógeno verde, 6 GW para 2024 y 40 GW para 2030. Con esto la UE espera implementar el “European Green Deal”, ya que Europa es altamente competitiva en la manufactura de tecnología para hidrógeno verde, además de que tiene una posición estratégica para beneficiarse del desarrollo global del hidrógeno como un vector energético, lo que puede contribuir a que el hidrógeno verde cumpla el 24% de la demanda energética mundial para 2050 (Comisión Europea, 2020).

La UE, en 2023, tiene 27 miembros en total. De todos sus miembros, la mayoría han incluido planes que contemplan hidrógeno verde en sus estrategias nacionales energéticas y climáticas y 26 miembros han firmado la “Hydrogen Initiative” (Comisión Europea, 2020). Entonces, se puede observar que el desarrollo del hidrógeno verde es una prioridad; sin embargo, no se usarían todas las energías renovables existentes, sino que se enfocaría el desarrollo para la producción con energía solar y eólica (Comisión Europea, 2020). Pero el enfoque a largo plazo es la construcción de un sistema integrado para cumplir con la neutralidad climática de la UE.

#### 1.6.1.2.1 FASES DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Las fases de la transición energética se desarrollan a través de una trayectoria gradual a lo largo de tres periodos consecutivos, desde 2020 hasta 2050, y con acciones correspondientes para tal momento de la transición, se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6 Fases de transición para la adopción de hidrógeno verde en la UE, 2020-2050, hecha con datos de (Comisión Europea, 2020).**

PERIODO	ACCIONES
<b>2020-2024</b>	Instalación de, al menos, 6 GW de electrolizadores para $H_2$ verde. Escalamiento de electrolizadores de gran capacidad, mayores a 100 MW. Para que se energicen con energías renovables, idealmente. Descarbonizar la producción de $H_2$ existente, con una demanda de 520 Mt (IEA, 2021) Fomentar el consumo de $H_2$ verde en nuevas aplicaciones como: procesos industriales y transporte pesado. Modificaciones pertinentes a sitios productores de $H_2$ para adaptar métodos de CCUS. Conseguir una producción de hasta 1 MT de $H_2$ .

<b>2025-2030</b>	<p>Convertir al <math>H_2</math> como una parte intrínseca de una matriz energética integrada. Instalación de, al menos, 40 GW de electrolizadores para <math>H_2</math> verde. Se espera que el costo del hidrógeno verde sea competitivo respecto a otros métodos de producción.</p> <p>Almacenamiento diario o por temporadas de <math>H_2</math> para el almacenamiento de energía. Desarrollar sitios remotos producción de hidrógeno para descentralizar la producción de energía renovable y que dependan de la producción energética local.</p> <p>Distribución nacional o transnacional de <math>H_2</math>, desde centros de producción hacia centros de demanda. Para el transporte de <math>H_2</math> se usaría, posiblemente, la red de distribución de gas natural para el abastecimiento a través de grandes distancias.</p> <p>Conseguir una producción de hasta 10 MT de <math>H_2</math>.</p> <p>Para 2030 se espera completar un mercado de hidrógeno en la UE abierto y competitivo, con tránsito internacional y sin obstáculos</p>
<b>2030-2050</b>	<p>La tecnología pertinente para la producción de <math>H_2</math> verde llegarían a su madurez tecnológica y será desplegada a gran escala en los sectores difíciles de descarbonizar.</p> <p>La generación de energía eléctrica debe de crecer, aproximadamente una cuarta parte, ya que se usaría para la producción de <math>H_2</math>.</p>

### 1.6.1.3 ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

El reconocimiento que recibe el hidrógeno en los Estados Unidos de América (EEUU) se asemeja en valor a los otros dos ejemplos mostrados con anterioridad. De tal forma que se puede aprovechar el hidrógeno como un recurso energético que puede asistir con la neutralidad climática de EEUU en 2050, sin comprometer la seguridad y resiliencia de la matriz energética. Además de que el  $H_2$  es una tecnología que puede habilitar a las energías renovables con para el almacenamiento energético de larga duración.

Se han destinado recursos financieros con el proyecto de Ley de Infraestructura Bipartisan que fue aprobado a finales de 2021, que acumulan a 9.5 billones de USD (Department of Energy, 2023). Para la colocación eficiente de los recursos destinados se tiene como guía la estrategia nacional de hidrógeno limpio, la cual se enfoca en tres estrategias principales señaladas en la Tabla 7.

**Tabla 7 Estrategias a seguir en EEUU para la adopción de hidrógeno limpio (Department of Energy, 2023).**

\*El objetivo de la estrategia “1 1 1” indica que el costo de 1 kg de  $H_2$  tendrá un costo de 1 USD en 1 década.

<b>ESTRATEGIA</b>	<b>ACCIONES</b>
<b>Enfoque estratégico en usos de alto impacto para hidrógeno verde</b>	Se asegurará que el $H_2$ sea destinado a sectores en los cuales las opciones de descarbonización sean limitadas.
<b>Reducir el costo del hidrógeno verde</b>	Siguiendo la estrategia “1 1 1” * se estimulará la inversión privada para que exista un desarrollo constante a lo largo de toda la cadena de suministros.
<b>Enfoque en redes locales</b>	Inversión y escalamiento en centros de producción regionales para tener una producción a gran escala de $H_2$ verde, cercana a usuarios de gran prioridad.

#### 1.6.1.3.1 FASES DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La adopción de la tecnología energética de hidrógeno verde en EEUU se lleva a cabo

por etapas, tres para ser precisos, las cuales están asociadas al corto, mediano y largo plazo de la estrategia. Aunque los plazos que cada fase implica dependen del desarrollo tecnológico y político; sin embargo, los esfuerzos se concentrarán, siempre, en sectores que ofrezcan la mejor alternativa comercial con falta de alternativas para la descarbonización y que aumenten el impacto público. De acuerdo con la evolución prevista de los mercados pertinentes para el desarrollo del  $H_2$  como vector energético en EEUU es la planeación que se llevará a cabo, así como el orden de priorización que se da a las distintas opciones disponibles, como se muestra en la Tabla 8. Sin embargo, este orden de priorización está sujeto a cambios que pueden ser de múltiples orígenes, desde opiniones de inversionistas hasta el avance tecnológico alcanzado en cierto periodo.

**Tabla 8 Fases de transición energética para EEUU en corto, mediano y largo plazo (Department of Energy, 2023).**

<b>PLAZO</b>	<b>PERIODO</b>	<b>ACCIONES</b>
<b>Corto</b>	<b>2022-2025</b>	Dentro de mercados existentes, con pocas alternativas para $H_2$ verde para su descarbonización, se desarrollarán accesos a $H_2$ en aplicaciones que puedan disminuir costos y mejorar la infraestructura para las fases subsecuentes.
<b>Mediano</b>	<b>2026-2029</b>	Las aplicaciones propuestas van más allá de la primera fase, apoyándose de las políticas y aceptación que ha tenido el uso de $H_2$ . De tal manera que la propuesta de valor ofrecida crezca
<b>Largo</b>	<b>2030-2035</b>	Conforme los costos disminuyan y la infraestructura se desarrolle, se ampliará el portafolio de aplicaciones. De tal forma que se reemplazará a los combustibles fósiles en industrias con una alta demanda energética.

## 1.6.2 **NORMATIVA INTERNACIONAL ISO**

Las iniciativas de los distintos países y conglomerados que están en proceso de adoptar al hidrógeno como vector energético a gran escala marcan el estado actual y el objetivo que se desea conseguir. Sin embargo, no indican como tal una metodología o parámetros operativos que se deben de respetar en el uso; la producción; la distribución; y, la tecnología asociada al hidrógeno. Para tal propósito existen distintas normas, se sigue con mayor frecuencia a las normas internacionales como: ISO

### 1.6.2.1 **NORMAS ISO**

Las normas ISO están desarrolladas con la cooperación de expertos de distintas nacionalidades, todo para producir estándares con validez internacional y facilitar el estudio, construcción y comercialización de los proyectos que involucren una de sus normas. En el caso del TC 197 se tiene una división por grupos de trabajo, cada uno de estos grupos se encarga de generar estándares relevantes al objetivo general de cada uno, en la Tabla 9 se muestran los grupos de trabajo dentro del TC 197.

**Tabla 9 Grupos de trabajo de ISO/TC 197 para la estandarización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, medición y uso del hidrógeno, tomado de (ISO, 1990).**

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>ISO/TC 197/AHG 1</i>	Comité permanente de edición
<i>ISO/TC 197/JWG 30</i> <i>- Joint ISO/TC 197 -</i> <i>ISO/TC 22/SC 41</i> <i>WG:</i>	Componentes para el sistema de combustible de hidrógeno gaseoso de vehículos terrestres
<i>ISO/TC 197/TAB 1</i>	Junta de asesoría técnica
<i>ISO/TC 197/WG 5</i>	Dispositivos de conexión para reabastecimiento de hidrógeno gaseoso como combustible para vehículos terrestres
<i>ISO/TC 197/WG 6</i>	Hidrógeno gaseoso y mezclas de Hidrógeno para tanques de combustible en vehículos terrestres
<i>ISO/TC 197/WG 8</i>	Generadores de hidrógeno con proceso de electrólisis de agua
<i>ISO/TC 197/WG 9</i>	Generadores de hidrógeno con procesamiento de combustibles fósiles
<i>ISO/TC 197/WG 10</i>	Dispositivos para transporte y almacenamiento de gas – Hidrógeno absorbido en hidruro metálico reversible
<i>ISO/TC 197/WG 11</i>	Hidrógeno gaseoso – Estaciones de llenado combustible
<i>ISO/TC 197/WG 12</i>	Hidrógeno combustible – Especificación de productos. – Aplicaciones de celdas de combustibles PEM para vehículos terrestres
<i>ISO/TC 197/WG 13</i>	Aparatos para detección de hidrógeno – Aplicaciones estacionarias
<i>ISO/TC 197/WG 15</i>	Cilindros y tubos para almacenamiento estacionario
<i>ISO/TC 197/WG 17</i>	Sistemas de balance y absorción de presión para separación y purificación de hidrógeno
<i>ISO/TC 197/WG 18</i>	Tanques de combustible de hidrógeno gaseoso para vehículos terrestres y equipos de activación térmica para el alivio de presión
<i>ISO/TC 197/WG 19</i>	Dispensadores de hidrógeno gaseoso en estaciones de llenado de combustible
<i>ISO/TC 197/WG 20</i>	Válvulas de hidrógeno gaseoso en estaciones de llenado de combustible
<i>ISO/TC 197/WG 21</i>	Compresores de hidrógeno gaseoso en estaciones de llenado de combustible
<i>ISO/TC 197/WG 22</i>	Mangueras para hidrógeno gaseoso en estaciones de llenado de combustible
<i>ISO/TC 197/WG 23</i>	Accesorios para hidrógeno gaseoso en estaciones de llenado de combustible
<i>ISO/TC 197/WG 24</i>	Hidrógeno gaseoso – Protocolos de llenado de combustible para vehículos compatibles
<i>ISO/TC 197/WG 25</i>	Hidrógeno absorbido por hidruro metálico reversible
<i>ISO/TC 197/WG 26</i>	Generadores de hidrógeno que usan electrólisis de agua
<i>ISO/TC 197/WG 27</i>	Calidad del hidrógeno combustible
<i>ISO/TC 197/WG 28</i>	Control de calidad del hidrógeno
<i>ISO/TC 197/WG 29</i>	Consideraciones básicas para la seguridad de los sistemas de hidrógeno
<i>ISO/TC 197/WG 30</i>	Componentes del sistema de combustible con hidrógeno gaseoso para un vehículo terrestre
<i>ISO/TC 197/WG 31</i>	Juntas tóricas, “O-rings”
<i>ISO/TC 197/WG 32</i>	Generadores de hidrógeno que usan electrólisis de agua
<i>ISO/TC 197/WG 33</i>	Muestreo para análisis de calidad del combustible
<i>ISO/TC 197/WG 34</i>	Generadores de hidrógeno que usan protocolos de prueba y requerimientos de seguridad en la electrólisis de agua

### 1.6.3 MARCO LEGAL EN MÉXICO

A continuación, se dará una breve recapitulación del estado legal en el que se define el hidrógeno. Lo cual iniciará desde el nivel más alto, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, bajando hasta las solicitudes realizadas por la cámara de diputados en los años recientes, recopiladas en la Tabla 10; finalizando con la ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES LIMPIOS.

En lo que concierne a México, todos los recursos naturales pertenecen al estado mexicano de acuerdo con el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), como se señala en la siguiente cita:

*“Corresponde a la Nación el dominio directo de todos los recursos naturales de la plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas; de todos los minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos, constituyan depósitos cuya naturaleza sea distinta de los componentes de los terrenos, tales como los minerales de los que se extraigan metales y metaloides utilizados en la industria; los yacimientos de piedras preciosas, de sal de gema y las salinas formadas directamente por las aguas marinas; los productos derivados de la descomposición de las rocas, cuando su explotación necesite trabajos subterráneos; los yacimientos minerales u orgánicos de materias susceptibles de ser utilizadas como fertilizantes; los combustibles minerales sólidos; el petróleo y todos los carburos de hidrógeno sólidos, líquidos o gaseosos; y el espacio situado sobre el territorio nacional, en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022)*

Se indica un dominio completo del estado mexicano sobre todos los recursos energéticos, designados en la cita anterior como “carburos de hidrógeno”, designación que abarca al hidrógeno como energético (Aguirre Quezada, 2022). De tal forma que cualquier deseo de explotar el hidrógeno, comercialmente, debe de ser por medio de una concesión del poder Ejecutivo Federal (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

En los años recientes, conforme ha ido ganando popularidad en el sector energético, se han hecho reformas a distintas leyes, además de la creación de otras, para el desarrollo energético, uso, almacenamiento, operación y comercialización del hidrógeno (Aguirre Quezada, 2022)

El hidrógeno está regulado dentro de la LIE, en el inciso “g” de la fracción XXII del artículo tercero, como una tecnología de con aspiraciones de conseguir la certificación de energía limpia (Aguirre Quezada, 2022). En la LIE se establece que el aprovechamiento del hidrógeno en si es una energía limpia siempre y cuando se cumplan los criterios de eficiencia en el método de producción (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022). En caso de tratarse de hidrógeno proveniente de hidrocarburos o carbón, se debe de conseguir una eficiencia del 70% para que se considere como energía limpia (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

Dentro de la LXIV Legislatura de la Cámara de Diputados y el Senado de la República se presentaron y aprobaron 5 iniciativas, de 16 que fueron propuestas, en el DOF que modifican las siguientes leyes: la Ley del Impuesto sobre la Renta; la Ley del Impuesto al Valor Agregado; la Ley de Caminos, Puentes, y Autotransporte Federal; y, la Ley General de Cambio Climático. Para la LXV Legislatura se han presentado 6 iniciativas que se refieren al aprovechamiento del hidrógeno, se muestran en la Tabla 10 tomada de (Aguirre Quezada, 2022).

**Tabla 10 Iniciativas presentadas en la LXV Legislatura de la Cámara de Diputados y el Senado de la República acerca de hidrógeno, tomada de (Aguirre Quezada, 2022).**

<b>INICIATIVA</b>	<b>FECHA</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>PRESENTA</b>	<b>ESTATUS</b>
Que adiciona el artículo 151 de la Ley del Impuesto sobre la Renta	12 de octubre de 2021	Otorgar estímulos fiscales a las personas físicas que compren vehículos eléctricos e híbridos. Para ello se propone que se podrán deducir los intereses reales efectivamente pagados en el ejercicio por créditos automotrices destinados a la adquisición de automóviles cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como los automóviles eléctricos que además cuenten con motor	Dip. Sarai Núñez Cerón	Pendiente en Comisión(es) de Cámara de Origen 12 de octubre de 2021
Que adiciona a los artículos 34 y 151 de la Ley del Impuesto sobre la Renta	7 de abril de 2022	Establecer deducciones por la compra de vehículos propulsados total o parcialmente por baterías eléctricas recargables, motores eléctricos, motores accionados por hidrógeno u otra tecnología análoga. Para ello propone: 1) señalar el 40% como por ciento máximo autorizado para realizar deducciones, tratándose de vehículos propulsados total o parcialmente por baterías eléctricas recargables, motores eléctricos, motores accionados por hidrógeno u otra tecnología análoga; y, 2) determinar que las personas físicas podrán hacer deducciones personales de los intereses reales efectivamente pagados en el ejercicio anual por créditos automotrices destinados a la adquisición o enajenación de vehículos propulsados total o parcialmente por baterías eléctricas recargables, motores eléctricos, motores accionados por hidrógeno u otra tecnología análoga.	Dip. Marcia Solorzano Gallego	Pendiente en Comisión(es) de Cámara de Origen 7 de abril de 2022
Que reforma el artículo 36 de la Ley del Impuesto sobre la Renta	12 de octubre de 2021	Incentivar la utilización de medios de transporte menos contaminantes, a través de estímulos fiscales. Para ello propone: 1) determinar que las inversiones en automóviles solo serán de deducibles hasta por un monto de \$300,000.00; y, 2) señalar que tratándose de inversiones realizadas en automóviles cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como los automóviles eléctricos que además cuenten con motor de combustión interna o con motor accionado por hidrógeno, solo serán deducibles hasta por un monto de \$500,00.00	Dip. Sarai Núñez Cerón	Pendiente en Comisión (es) de Cámara de Origen 12 de octubre de 2021

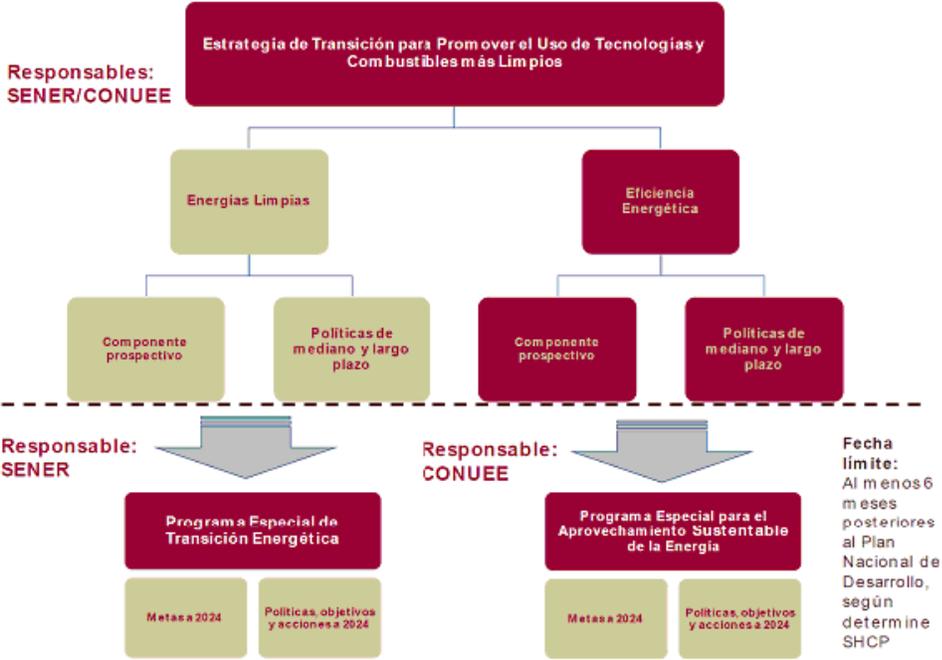
INICIATIVA	FECHA	OBJETIVO	PRESENTA	ESTATUS
Que reforma y adiciona diversas posiciones de la Ley de Transición Energética y de la Ley del Impuesto sobre la Renta	26 de octubre de 2021	Incorporar el hidrógeno renovable en el listado de las energías renovables y promover incentivos fiscales para quien utilicen dichas energías. Para ello se propone: 1) definir a éste como el generado por la electrólisis del agua, utilizando electricidad proveniente de otras energías renovables; 2) precisar que el por ciento máximos autorizados para energías limpias será el de 100%; y, 3) resaltar que serán consideradas energías renovables aquellas definidas como tales en la Ley de Transición Energética. Para tal fin se modifican los artículos 2 y 3 de la Ley de Transición Energética; y, 34 de la Ley del Impuesto sobre la Renta	Sen. Manuel Velasco Coello	Pendiente en Comisión (es) de Cámara de Origen 26 de octubre de 2021
Que reforma y adiciona el artículo 151 de la Ley del Impuesto sobre la Renta	7 de abril de 2022	Aplicar una deducción fiscal a las personas físicas residentes en el país, sin importar el régimen de tributación, por la adquisición de vehículos impulsados por baterías recargables, hidrógeno o vehículos híbridos que utilicen energías limpias para su operación. Para ello se propone: 1) establecer que las personas físicas para calcular su impuesto anual, podrán deducir, por el ejercicio de adquisición y en los tres ejercicios fiscales siguientes, el equivalente al 25% del 80% del valor de adquisición, sin incluir el IVA, de automóviles cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como los automóviles eléctricos que además cuenten con motor de combustión interna o con motor accionado por hidrógeno; y, 2) señalar que el monto total de las deducciones que podrán efectuar los contribuyentes no podrán exceder de la cantidad que resulte menor entre cinco veces el valor anual de los ingresos del contribuyente, incluyendo aquellos por los que no se pague el impuesto.	Dip. Patricia Terrazas Baca	Pendiente en Comisión(es) de Cámara de Origen 7 de abril de 2022
Que reforma y adiciona el artículo 36 de la Ley del Impuesto sobre la Renta	8 de marzo de 2022	Aumentar las deducciones por las inversiones en automóviles. Para ello propone: 1) establecer que las inversiones en automóviles serán deducibles hasta por un monto de 3,400 Unidades de Medida y Actualización; 2) señalar que tratándose de inversiones realizadas en automóviles cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como los automóviles eléctricos que además cuenten con motor accionado por hidrógeno serán deducibles hasta por un monto de 4,420 Unidades de Medida y Actualización; y, 3) indicar que tratándose de inversiones realizadas en automóviles hechos en México, tendrán 15 por ciento adicional conforme al índice anterior	Dip. Noemi Berenice Luna Ayala	Pendiente en Comisión(es) de Cámara de Origen 8 de marzo de 2022

**1.6.3.1 ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES LIMPIOS**

El estado mexicano, usando la LTE como ente regulador, tiene una estrategia nacional

propia. Esta es el elemento rector de la política energética nacional en el mediano y largo plazo. El objetivo es fomentar la reducción de emisiones contaminantes originadas por la industria eléctrica y reducir, con un enfoque de viabilidad económica, la dependencia de combustibles fósiles como una fuente energética primaria. Esta estrategia tiene dos componentes de planeación a mediano y largo plazo, 15 y 30 años respectivamente.

La estrategia delimita la creación de: el PETE, enfocado a instrumentar las acciones establecidas en la propia Estrategia para la Administración Pública Federal para su viabilidad económica; el PRONASE, con el objetivo de establecer acciones y actividades derivadas de la Estrategia que permitan el alcance de las metas definidas en materia de eficiencia energética; la Hoja de Ruta de Eficiencia Energética, que marcará los pasos a seguir de acuerdo con el PRONASE; el PRODESEN; y, los PAMRNT (Secretaria de Energía , 2020). La estructura jerárquica de la estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles limpios (ETPUTCL) viene descrita en la Figura 10.

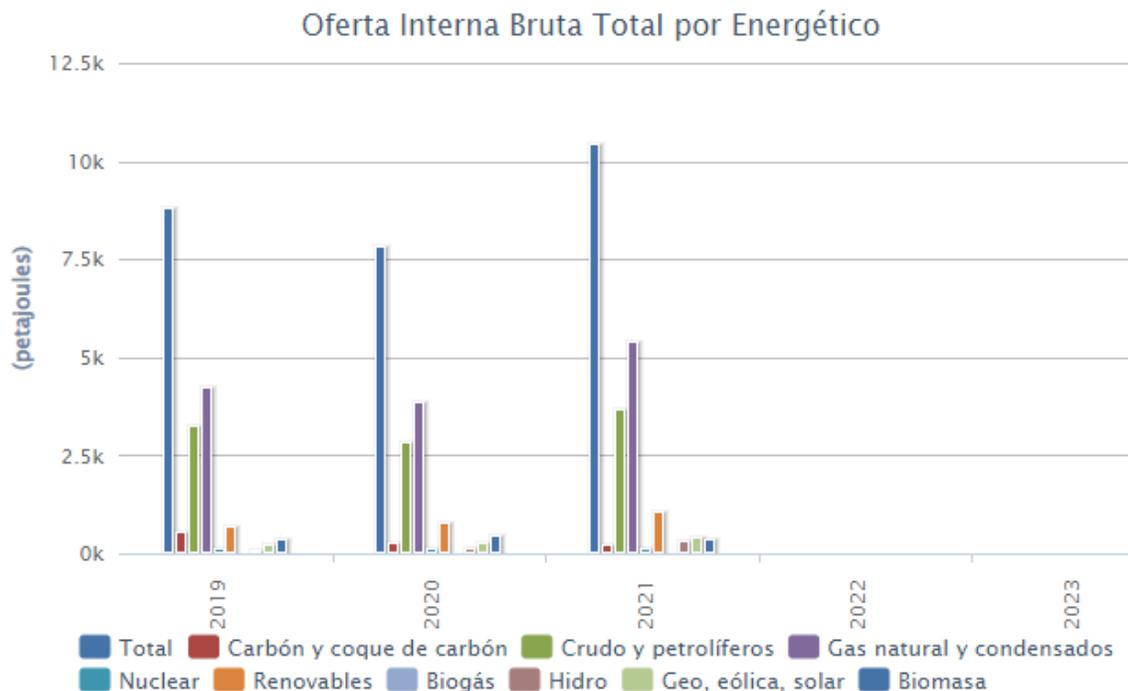


**Figura 10 Alineación de metas de energías limpias y eficiencia energética en los instrumentos de planeación de la Ley de Transición Energética, tomado de (Secretaria de Energía , 2020).**

La matriz energética mexicana tenía una dependencia notable del aprovechamiento de los hidrocarburos, principalmente por ser un país productor con una producción superavitaria que le permitía una autosuficiencia energética. Sin embargo, el declive de la producción petrolera y un aumento constante de la demanda energética condujeron a un aumento de exportaciones de crudo por falta de capacidad de refinación e importaciones incrementales de gasolinas. (Secretaria de Energía , 2020).

De esta manera, el uso de fuentes energéticas alternas ha tomado una posición central en el desarrollo de la matriz energética. Pero la oferta energética más grande, al interior del país, siguen siendo el petróleo y sus derivados, ya que el porcentaje que representan dichas

energías alternas es inferior al del crudo y gas natural, como se puede ver en la Figura 11.



**Figura 11 Oferta de la matriz energética mexicana, 2019-2021, elaborado con (Secretaria de Energía, 2023)**

A pesar de que la transición energética está planificada, no se tenía contemplado al hidrógeno como un recurso para este fin más que en un uso de gasificación dentro del apartado de bioenergías de la ETPUTCL (Secretaria de Energía, 2020). Pero en 2022, se propuso agregar a la ETPUTCL al hidrógeno verde. Dentro de esta petición se hicieron notar los beneficios asociados al uso del  $H_2$  como el almacenamiento energético y el uso de energías limpias. Además de que en México se tiene un alto potencial de energía renovable, con proyectos pilotos en desarrollo y la capacidad técnica, industrial y académica para el aprovechamiento del hidrógeno verde (Deutsche gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2021). El potencial que se prevé, para 2050 es de 11 GW de demanda que podrían ser suministrados por procesos de electrólisis (Alianza Energética México-Alemania, 2021). Por esto se pidió que le SENER incluya al  $H_2$  dentro de la ETPUTCL y desarrolle una hoja de ruta con acciones en el mediano y largo plazo (Godínez del Río, 2022).

Una vez que se hizo la petición, se puede ver que en el PAMRNT 2023-2037 se hace mención de ciclos combinados que usan  $H_2$  en las regiones que tengan disponibilidad de recurso hídrico y baja disponibilidad de gas natural. Así, la propuesta del PIIRCE 2023-2037 acerca del  $H_2$  verde que busca utilizar las regiones con potencial para producción y la infraestructura de gasoductos, aprovecha para convertir 5594MW e instalar 695MW gradualmente en la red eléctrica de centrales eléctricas ciclos combinados que aprovechen  $H_2$  (Centro Nacional de Control de Energía, 2023).

## 1.7 MARCO TÉCNICO DE LA PRODUCCIÓN DE H<sub>2</sub> VERDE

Este apartado tiene como finalidad mostrar los requerimientos técnicos y tecnológicos necesarios para la producción de hidrógeno verde. Se explorará cada uno de los métodos asociados a dicha clasificación, mostrados en la Tabla 4. En lo que respecta al hidrógeno verde sólo se explorará lo correspondiente a la electrólisis, ya que la fuente energizante para el proceso electrolítico de la propuesta central de esta tesis se discutirá con mayor detalle en capítulos posteriores.

### 1.7.1 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN

De acuerdo con la Tabla 4 se pueden clasificar los tipos de hidrógeno, catalogados por su método de producción y el color que se les asocia. Dentro de esta clasificación están los métodos de bajas emisiones o el hidrógeno limpio. En lo que respecta al hidrógeno de bajas emisiones, se clasifica como azul y se produce con métodos de reformación de hidrocarburos con mitigación por CCUS. La producción de este tipo de hidrógeno es la que predomina por encima del hidrógeno verde, como se mostró en el apartado 1.4 PERSPECTIVA DE LA DEMANDA Y PRODUCCIÓN DE h<sub>2</sub> HASTA 2030, es por eso que vale la pena mostrar rápidamente los métodos a través de los cuales se pueden producir H<sub>2</sub> azul.

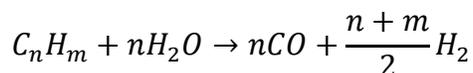
### 1.7.2 HIDRÓGENO AZUL

El hidrógeno azul viene del reformado de combustibles fósiles, en la cual se rompen las moléculas del hidrocarburo para conseguir el hidrógeno deseado. El motivo por el cual este tipo de producción de hidrógeno es ampliamente utilizado para generar hidrógeno es el hecho de que la densidad energética, en base volumétrica y másica, de los hidrocarburos es mayor que la del hidrógeno, ANEXOS DEL CAPÍTULO 1 (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014). Es por esto que se ha preferido el almacenamiento y transporte de recursos energéticos con mayor densidad energética y hacer un proceso de reformado posterior.

Para que se considere a cualquiera de los métodos de reformado de hidrocarburos como métodos de bajas emisiones se debe de contar con alguna forma de CCUS. Estos métodos de CCUS implican retirar el CO<sub>2</sub> de los gases emitidos, así como de la misma atmósfera para que se le pueda almacenar de forma segura o se pueda utilizar en procesos industriales. La captura involucra tecnología de absorción que pueda contener eficientemente al CO<sub>2</sub> contenido en los gases.

#### 1.7.2.1 REFORMADO CON VAPOR

La reacción que típicamente representa los procesos de reformado de vapor (SR, por sus siglas en inglés) se muestra en la Ecuación 1, el cual es el método más popular para la producción de hidrógeno (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014). Los combustibles que se pueden utilizar son numerosos y se pueden utilizar gasolinas, etanol, metanol, dimetil éter, propano, butano, gas natural, diésel, iso-octano y combustible de jet; sin embargo, en el uso de hidrocarburos más pesados se puede correr el riesgo de la formación de compuestos intermedios, carbón y coque (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).

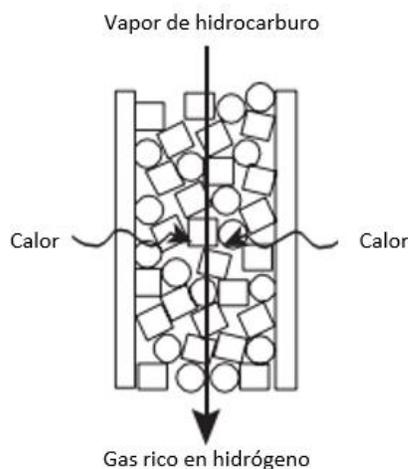


**Ecuación 1 Reacción química, endotérmica, típica para el reformado con vapor de hidrocarburos en hidrógeno, tomada de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).**

En la Ecuación 1 se muestra la reacción endotérmica que se manifiesta típicamente en los procesos de reformado de vapor de hidrocarburos. En dicho proceso se ejemplifica al hidrocarburo, de manera generalizada  $C_nH_m$ , siendo adicionado a una cierta cantidad “n” de vapor de agua. Esta suma de reactivos produce la misma cantidad “n” de monóxido de carbono (CO) y una cierta cantidad de hidrógeno.

Un proceso de SR es endotérmico, requiere de energía para que sea factible, la energía requerida se da en forma de calor Figura 12. Para facilitar la reacción se usan diversos tipos de catalizadores, que idealmente no deberían de consumirse; sin embargo, en la práctica siempre sufren cambios físicos y químicos. Los catalizadores tienen tres modos en los que trabajan: activación, selectividad y estabilidad o degradación

La activación es la rapidez con la que se da la reacción en presencia del catalizador, lo cual está influenciado por la temperatura, presión, tiempo de residencia y concentración química. Mientras que la selectividad es la medida del producto deseado en función de la cantidad del catalizador, el rendimiento. Finalmente, la estabilidad proporcionada por el catalizador evita la formación de productos indeseados, que podrían ser carbón o coque. Los catalizadores no son de uso exclusivo para SR, sino que todos los procesos de reformado los utilizan.

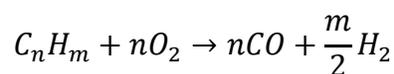


**Figura 12 Diagrama del funcionamiento de SR, tomado de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).**

### 1.7.2.2 REFORMADO CON OXIDACIÓN PARCIAL

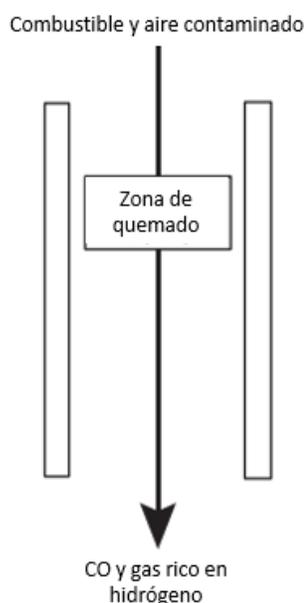
Una alternativa al SR es un proceso de reformado con oxidación parcial (POX, por sus siglas en inglés), el cual tiene una producción menor de  $H_2$ ; sin embargo, se utiliza en situaciones en las que el tiempo de producción es crucial y se requiere una solución compacta.

Aunque el POX se debe de llevar a cabo a altas temperaturas y es propenso a la formación de coque, estas dos desventajas pueden ser mitigadas con el uso de catalizadores. Pero el uso de un catalizador no es necesario para este tipo de reformado, en caso de que se use uno se le conoce al proceso como CPOX. Para describir químicamente la reacción del reformado POX se usa la Ecuación 2.



**Ecuación 2** Reacción química, exotérmica, que describe de forma general el reformado POX, tomada de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).

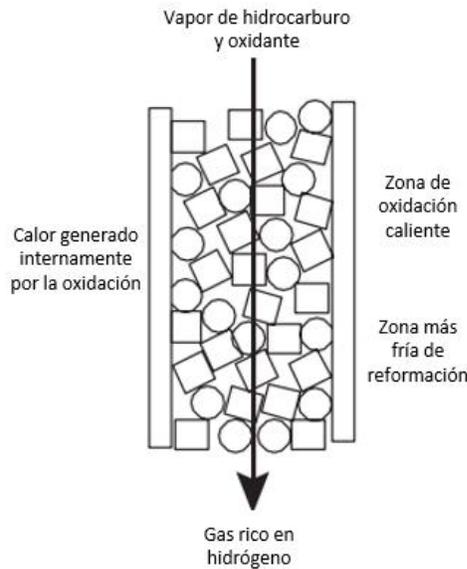
Un proceso de POX se asemeja mucho a uno de combustión y tiene un tiempo de activación corto, por la naturaleza exotérmica de la reacción. Esta reacción se lleva a cabo, sin un catalizador, a una temperatura que varía en el rango de 1300°C a 1500°C. En la Figura 13 se muestra un diagrama de un proceso de POX.



**Figura 13** Diagrama de un proceso de reformado POX, tomado de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).

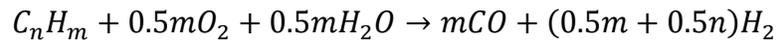
### 1.7.2.3 REFORMADO AUTOTÉRMICO

EL último proceso de reformado el reformado autotérmico (ATR, por sus siglas en inglés), el cual combina los dos métodos de reformado previos, SR y POX. Esto se consigue al colocar los dos procesos en proximidad térmica suficiente o dentro de un mismo reactor, pero la transferencia de calor es más eficiente cuando se usa solo un reactor. Debido a que el proceso de ATR es la fusión de los reformados por SR y POX, es natural que combine las ventajas de estos dos. Lo que implica que el reformado ATR tiene el potencial de producir una concentración alta de  $H_2$  y tiempos de producción más rápidos.



**Figura 14 Diagrama de un proceso, térmico neutral, ATR; tomado de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).**

El funcionamiento de un proceso de reformado ATR, mostrado en la Figura 14, aprovecha el calor producido de la reacción exotérmica de POX es utilizado para iniciar la reacción endotérmica del reformado SR. La operación de un proceso ATR implica el funcionamiento simultáneo de ambas partes, SR y POX. Un funcionamiento simultáneo y aprovechamiento del calor residual de la reacción POX implica que la reacción SR es autosostenible, de ahí su nombre autotérmico.



**Ecuación 3 Reacción química, adiabática, de un proceso de reformado ATR, tomada de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).**

En la Ecuación 3 se muestra la reacción química típica de un proceso de ATR. En esta reacción química se tiene a un hidrocarburo genérico que reacciona con una cierta cantidad de oxígeno diatómico ( $O_2$ ) y agua ( $H_2O$ ). Al finalizar la reacción se tiene como producto  $CO$  y una cierta cantidad de  $H_2$ .

Los rendimientos de los procesos, en la Tabla 11, muestra la cantidad de  $H_2$  que se puede conseguir en cada uno de ellos.

**Tabla 11 Rendimientos de distintos hidrocarburos por procesos SR y POX, tomada de (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014).**

COMBUSTIBLE	FORMULA	SR		POX	
		Wt% $H_2$	g $H_2$ / $L_{comb}$	Wt% $H_2$	g $H_2$ / $L_{comb}$
Metanol	$CH_3OH$	19%	150	13%	100

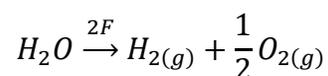
COMBUSTIBLE	FORMULA	SR		POX	
		Wt%H <sub>2</sub>	g H <sub>2</sub> / L <sub>comb</sub>	Wt%H <sub>2</sub>	g H <sub>2</sub> / L <sub>comb</sub>
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	26%	209	22%	168
Metanol	CH <sub>4</sub>	52%	205	38%	151
Gasolina	C <sub>8</sub> H <sub>15.4</sub>	43%	301	28%	200
Diesel	C <sub>14</sub> H <sub>25.5</sub>	42%	357	28%	231

### 1.7.3 HIDRÓGENO VERDE

Por otra parte, se tienen los métodos de producción de hidrógeno verde. Estos métodos involucran procesos de electrólisis, siempre y cuando se cumplan las condiciones indicadas en el apartado 1.5.1. Ya que el interés principal de esta tesis es la producción de hidrógeno a través de reacciones electro-químicas, las cuales se pueden dar en equipos de electrólisis. Por lo tanto, este apartado se enfocará exclusivamente en los mecanismos de la electrólisis y los dispositivos necesarios para implementarlos.

#### 1.7.3.1 TIPOS DE ELECTRÓLISIS

La electrólisis, es considerada como una forma limpia de producir hidrógeno. Es una reacción electro-química en la cual se disocia al hidrógeno del oxígeno en una molécula de agua. De tal forma, se generaliza a la electrólisis bajo un solo termino que engloba distintas formas de producir H<sub>2</sub>, se ejemplifica como la Ecuación 4, tomada de la Tabla 3. La existencia de distintas reacciones se puede atribuir a las diferentes configuraciones que existen para hacer una celda de electrólisis.



**Ecuación 4** Ecuación que describe, de forma generalizada, la electrólisis

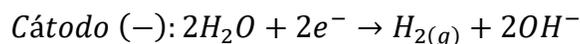
A pesar de que se enfatiza que existen distintos tipos de electrólisis, hay componentes que siempre estarán presentes como: conexión de carga positiva, ánodo; conexión de carga negativa, cátodo; electrolito para transporte de iones; y, una fuente de poder de corriente directa (CD). La electrólisis requiere de una fuente de corriente CD para energizar a las dos terminales, ánodo y cátodo, que se sumergen en el electrolito seleccionado. Las variaciones en la electrólisis provienen de las distintas opciones para estos componentes mencionados, en la Tabla 12 se identifican las posibilidades existentes de acuerdo con el tipo de electrolito usado.

Tabla 12 Variaciones del tipo de electrólisis de acuerdo con el tipo de electrolito usado en la celda, con información de (Bessarabov & Millet, 2018).

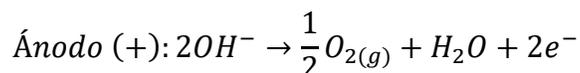
ELECTROLITO	DESCRIPCIÓN	CELDA
Alcalino	Electrolito alcalino que permite el uso de electrolito líquido o de polímero sólido.	Alcalina líquida AEM
Ácido	Electrolito ácido que permite el uso de electrolitos líquidos ácidos o de polímero sólido	Acídica líquida PEM
Óxido sólido	Operación bajo temperaturas mayores, con óxidos sólidos conductores de iones	SOEC

### 1.7.3.2 ELECTRÓLISIS EN CELDAS AEM Y CELDAS ALCALINAS LÍQUIDAS

Las celdas alcalinas (AEM, por sus siglas en inglés) y las celdas alcalinas líquidas son muy similares. La diferencia entre ambos tipos de celdas es la membrana o diafragma que separa las terminales eléctricas. Las celdas AEM tienen un diafragma de polímero sólido. Mientras que las celdas alcalinas líquidas tienen un diafragma con microporos, que separa ambas terminales. Las reacciones involucradas, dentro de ambas celdas, son las mismas cuando se aplica una corriente CD a las terminales eléctricas se producen las semirreacciones correspondientes a la Ecuación 5 y la Ecuación 6.

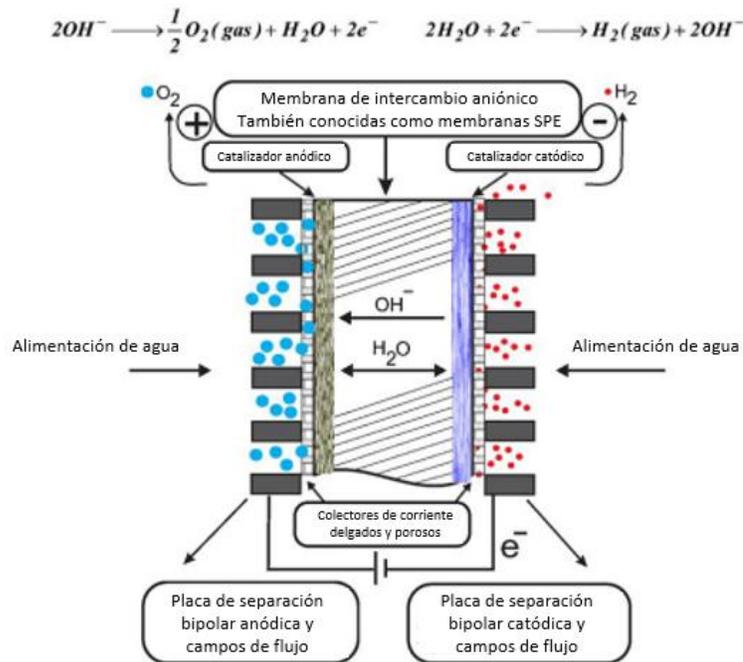


Ecuación 5 Semirreacción en el cátodo de una celda de electrolito alcalino (Bessarabov & Millet, 2018)



Ecuación 6 Semirreacción en el ánodo de una celda de electrolito alcalino (Bessarabov & Millet, 2018).

El funcionamiento de las celdas AEM, descrito en la Figura 15, indica que en el cátodo de la celda se recibe un mol de hidrógeno, ya en fase gaseosa, junto a dos moles de hidróxido. Los moles de hidróxido serán difundidos en el ánodo para que se oxiden, así se produce solo agua y oxígeno en el ánodo, ya que los electrones se mantienen dentro del circuito eléctrico.



**Figura 15 Diagrama del funcionamiento de una celda AEM para electrólisis, figura tomada de (Bessarabov & Millet, 2018).**

El funcionamiento de las celdas alcalinas líquidas, involucra el movimiento de moléculas de hidróxido a través de la membrana electrolítica de polímero sólido (SPE, por sus siglas en inglés). Una de las ventajas más notables de las celdas AEM es el hecho de que no se necesitan catalizadores de metales raros, si no que se pueden utilizar catalizadores de metales de transición de bajo costo (Bessarabov & Millet, 2018). Las celdas AEM también pueden entregar el H<sub>2</sub> a mayor presión, además de que pueden operar con un electrolito con menor concentración a diferencia de las celdas alcalinas líquidas.

A pesar de que las celdas alcalinas líquidas tienen un funcionamiento similar a las celdas AEM, ambas tienen una construcción diferente. Las celdas alcalinas líquidas operan con un electrolito alcalino en una concentración alta y un diafragma con microporos. En el caso particular de la Figura 16 se muestra un diseño sin espacios libres entre los componentes físicos. Tal diseño, sin espacios, indica una disminución de costos con un aumento en la eficiencia de la electrólisis alcalina (Bessarabov & Millet, 2018).

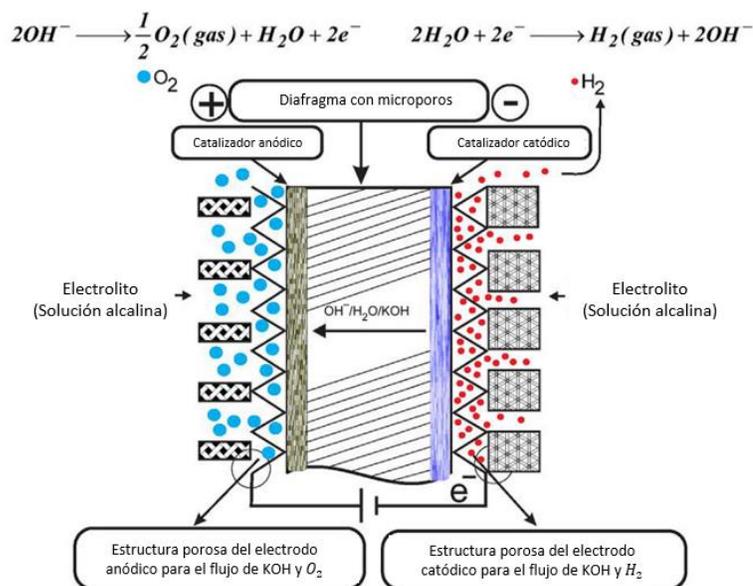
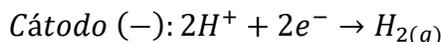


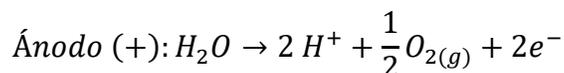
Figura 16 Diagrama del funcionamiento de una celda alcalina líquida para electrólisis, figura tomada de (Bessarabov & Millet, 2018).

### 1.7.3.3 ELECTRÓLISIS EN CELDAS PEM

La operación de una celda con membrana de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés), se caracteriza por el uso de una membrana de ácido perfluorsulfónico (PFSA, por sus siglas en inglés) y las semirreacciones indicadas en la Ecuación 7 y Ecuación 8 en las terminales eléctricas. Además de que no se usa un electrolito líquido, se usa un SPE para conducir los protones ( $H^+$ ), se usa agua desionizada. El uso de una celda PEM permite evadir efectos de corrosión, que son habituales en situaciones en las que agentes corrosivos están disueltos y son usados como electrolitos (Bessarabov & Millet, 2018).

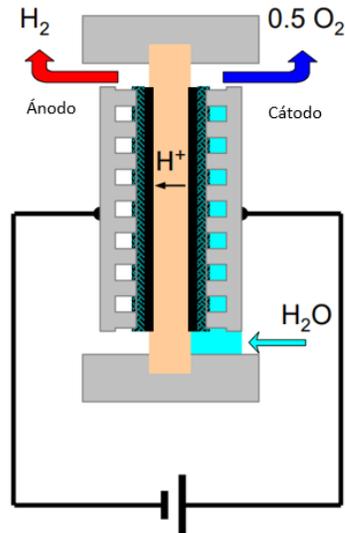


Ecuación 7 Semirreacción presente en el cátodo de una celda PEM, tomada de (Bessarabov & Millet, 2018).



Ecuación 8 Semirreacción presente en el ánodo para una celda PEM, tomada de Ibid, pág. 34.

Dentro de una celda PEM, Figura 17, se puede observar que la producción de  $H_2$  se da en el cátodo. En esta terminal se puede llegar a tener una presión alta de 200 bar (Bessarabov & Millet, 2018); además, la diferencia de presiones entre la entrada de agua y salida de gas puede llegar a ser de mayor a 69 bar Ibid, pág. 34. Sin embargo, existen las celdas PEM de baja presión como lo hace notar (Falcao & Pinto, 2020) y (Gacía-Valverde, Espinosa, & Urbina, 2012).

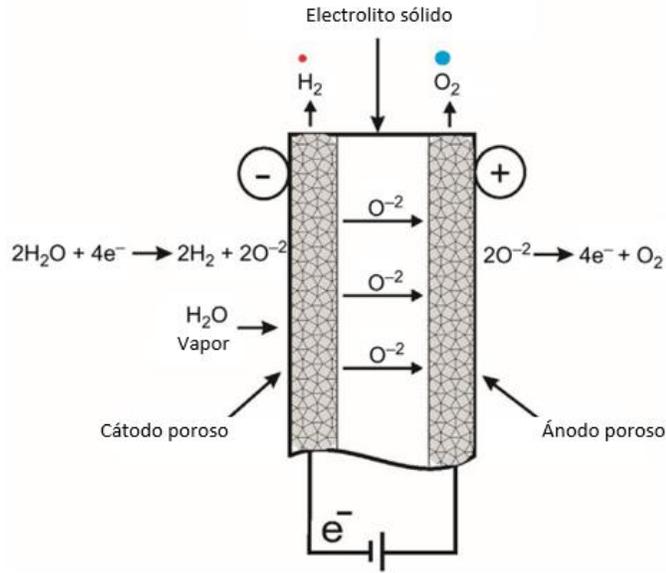


**Figura 17** Funcionamiento de una celda PEM, tomada de (Smolinka, 2010).

Las ventajas de este tipo de celdas, además de la presión diferencial elevada y la presión de descarga, se puede mencionar que no hay una posibilidad de arrastre ácido en el gas, la concentración del electrolito es fija y el uso de una de estas celdas resultan en un requerimiento mínimo de energía por unidad de hidrógeno generada (Bessarabov & Millet, 2018).

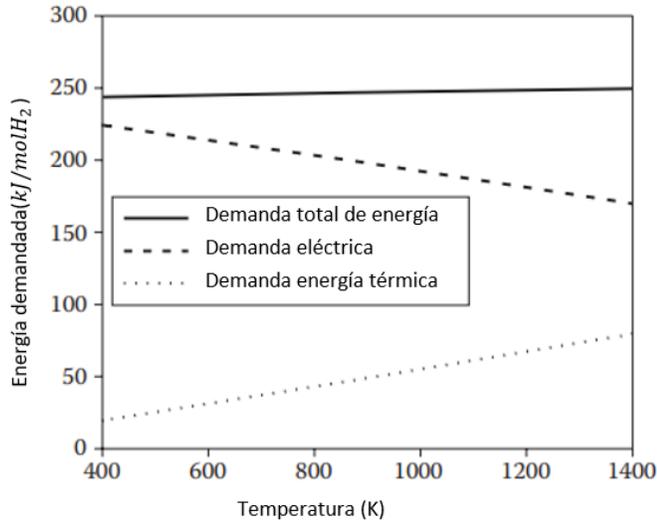
#### 1.7.3.4 ELECTRÓLISIS EN CELDAS SOEC

Las celdas electrolíticas con óxido sólido (SOEC, por sus siglas en inglés) tienen la particularidad de operar a una temperatura mayor que los otros tipos de celdas mostrados anteriormente, el rango de temperatura está entre  $700^{\circ}C$  y  $1000^{\circ}C$  (Bessarabov & Millet, 2018), la temperatura pudiera ser mayor dependiendo del material del electrolito (Leung, Ni, & Leung, 2014). Además, la temperatura de operación elevada, también se conducen iones de oxígeno ( $O^{2-}$ ) a través del electrolito sólido.



**Figura 18** Funcionamiento básico de una celda SOEC, figura tomada de (Bessarabov & Millet, 2018).

El funcionamiento de las celdas SOEC, como se puede ver en la Figura 19, muestra que la demanda de energía eléctrica disminuye conforme la temperatura aumenta. Estas dos energías se suman para conseguir el total de energía necesaria para producir 1 mol de  $H_2$ .



**Figura 19** Comportamiento de la energía total necesaria para producir 1 mol de hidrógeno en una celda SOEC, figura tomada de (Leung, Ni, & Leung, 2014)

La temperatura elevada de operación es benéfica para las celdas SOEC, ya que se puede disminuir el consumo eléctrico, dando la oportunidad de usar el calor remanente de procedimientos industriales que tengan dicha energía residual disponible. Pero al tener que soportar temperaturas mayores implica que los materiales necesarios para la construcción de las celdas SOEC deben de ser más duraderos, con límites operativos mayores para que la efectividad aumente y el costo sea efectivo (Leung, Ni, & Leung, 2014).

#### 1.7.4 EFICIENCIAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CELDAS Y SELECCIÓN DE MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE $H_2$

Las celdas de electrólisis ofrecen una variedad considerable de opciones para realizar el mismo proceso. De tal manera, es natural considerar las diferencias que existen entre cada una de las opciones en busca de la mejor alternativa. En la Tabla 13 se muestran las características que serán consideradas subsecuentemente para la selección del proceso electrolítico que se sumará a la propuesta objetivo de esta tesis.

**Tabla 13 Resumen comparativo de los distintos tipos de celdas disponibles, con datos de (Bessarabov & Millet, 2018) y (Ahmed, y otros, 2020)**

	<b>CELDA ALCALINA LÍQ.</b>	<b>PEM</b>	<b>SOEC</b>	<b>AEM</b>
<b>Madurez tecnológica</b>	Comercial, a gran escala (MW) TRL: 9	Comercial, pequeña y gran escala (MW) TRL: 7	I&D, precomercial TRL: 6	I&D, precomercial TRL: 6
<b>Temperatura °C</b>	40-90	50-90	700-1000	40-70
<b>Densidad de corriente <math>\frac{A}{cm^2}</math></b>	0.2-0.5	0.6-2.5	0.5-1	0.2-0.5
<b>Presión de <math>H_2</math> a la descarga bar</b>	2-30	15-50, con diseños conceptuales de 350	10-40	30
<b>Duración del sistema comprobada en años</b>	Hasta 20	Hasta 5	Hasta 1, con alta eficiencia y altas temperaturas	N/A
<b>Limitaciones</b>	Electrolito corrosivo, presión de descarga	Membrana PFSA y placas bipolares de alto costo	Temperatura de operación alta, difícil escalamiento	Durabilidad de membrana insuficiente
<b>Ventajas</b>	Tecnología probada a gran escala	Electrolito no corrosivo, alta presión de descarga con alta densidad de corriente	Alta eficiencia, posibilidad de varias reacciones de electrólisis	Componentes de bajo costo
<b>Eficiencias típicas a BOL</b>	60%-70%	65%-80%	Hasta 89%	40%

## 1.8 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

La economía del  $H_2$  es una que va creciendo año con año, independientemente del método de producción, ya que es un reactivo de gran demanda en muchos sectores industriales que lo utilizan para diferentes procesos. Sin embargo, se proyecta que la demanda será satisfecha por hidrógeno producido por métodos que utilizan combustibles fósiles o CCUS, ya que las cifras de desarrollo en tecnología de electrólisis; así como la cantidad de toneladas producidas por el mismo medio son menos en comparación.

En lo que respecta a la preparación a nivel mundial, se tiene un nivel de preparación, que es el comienzo de una reestructuración de la matriz energética. En este documento se exploraron los casos de la RPC, UE y EEUU como casos comparativos. Esto implicó analizar sus estrategias nacionales de transición energética, con sus fases de transición a corto, mediano y largo plazo. En resumen, las tres estrategias revisadas fueron enfáticas en la utilización del  $H_2$  a corto plazo; ya que este sería utilizado en centros industriales para consumo local, haciendo crecer paulatinamente la demanda, ya que el hidrógeno no se considera como un vector energético de largo alcance; sin embargo, si es posible, que el  $H_2$  sea producido y trasladado a gran escala para la descarbonización de sectores difíciles de descarbonizar.

Mientras tanto, en México, dentro de la LIE se toma en cuenta al  $H_2$  como una tecnología con la aspiración de volverse una energía limpia certificada; sin embargo, se establece que si la producción del reactivo cumple con los criterios de eficiencia según el método de producción. Por otro lado, en la Cámara de Diputado, en 2022 se sostuvieron diferentes mociones para incentivar el uso de tecnologías de aprovechamiento del  $H_2$ . En cuanto a la estrategia de transición mexicana, se reconoce la gran dependencia de los combustibles fósiles; pero si se ha tenido desarrollo en el uso de fuentes energéticas alternas. Sin embargo, el hidrógeno como tal no se tenía contemplado; a pesar de que México tenga un potencial para su explotación significativo que, en 2050, podría llegar a suplir una demanda de 11 GW

Por lo tanto, el proyecto de producción de  $H_2$  verde en México, de acuerdo a lo discutido en apartados anteriores y según el desarrollo actual, debe de tener la mayor cantidad de facilidades para su estudio, operación y un escalamiento posterior. Por lo que la tecnología debe de estar en un punto alto de su desarrollo. De manera similar, la eficiencia toma una posición importante; sin embargo, no se debe de sacrificar la vida útil de las piezas de las celdas por sus elevados costos. Entonces, las celdas con electrolito corrosivo y una membrana de corta vida útil no son opciones redituables a largo plazo.

En conclusión, debido a que se requiere de un equipo del cual ya exista información disponible, como lo serían las celdas PEM. Con estas celdas se puede acceder a una cantidad de información considerable, gracias al nivel de desarrollo. Con esta información se podrá abordar, en futuros capítulos, la estimación de la producción de  $H_2$  verde.

## 2 POSIBLES FUENTES DE ENERGÍA

La producción de  $H_2$  no está limitada a un solo tipo de energía; sin embargo, para que se puede producir a partir de un proceso electrolítico se necesita consumir electricidad. Pero, recordando lo que indica la Tabla 4 respecto a la clasificación del  $H_2$ , se debe de hacer una distinción entre los distintos métodos de producción. De tal forma, para que el  $H_2$  producido sea verde debe de provenir de utilizar electricidad generada por una fuente renovable.

Para México las posibilidades, en cuestión de energías renovables, no pasan desapercibidas ante el mundo. De tal forma que las energías renovables se podrían aprovechar aún más si el hidrógeno se utilizará como un medio efectivo de almacenamiento de energía y portador de energía en momentos de producción baja o nula energética (Cano Castillo, Becerra López, & González Díaz, 2021).

Entonces, es el objetivo de este capítulo indicar las diferentes energías renovables que pudieran ser utilizadas para energizar un sistema de electrólisis para la producción de  $H_2$  en México. Dichas energías renovables se muestran en el siguiente orden en los siguientes apartados: eólica, solar, hidroeléctrica, bioenergía y geotérmica. Se hará un énfasis particular en la energía geotérmica por el objetivo de esta tesis.

### 2.1 ENERGÍA EÓLICA

Es una energía renovable que ha tenido una gran aceptación a nivel mundial, como se puede ver en la Figura 20, ya que aprovecha la energía cinética de las ráfagas de viento. A pesar de que se tiene un límite teórico señalado por el número de Betz, de 59.3%, las bondades que ofrece son: que no se requiere de agua, no hay emisiones contaminantes que produzcan un impacto medioambiental dañino y los posibles incidentes son de bajo impacto ambiental (Villarrubia López, 2013).

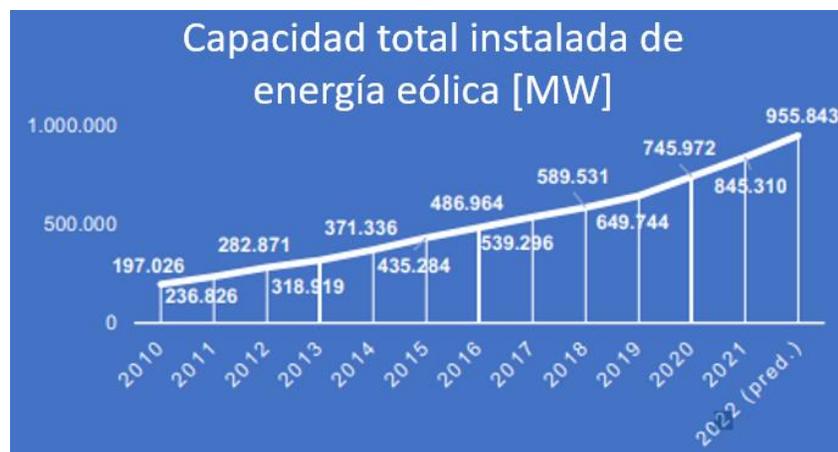


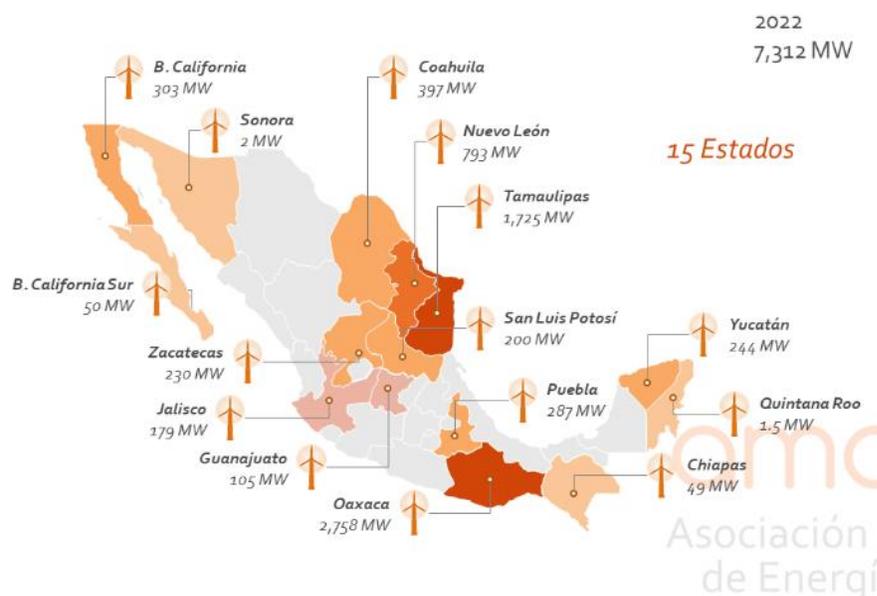
Figura 20 Capacidad total instalada de energía eólica MW, 2010-2022 (World Wind Energy Association, 2022)

Como se puede observar, la capacidad de aerogeneradores, con fines de producción eléctrica ha aumentado continuamente a lo largo de la década. Considerando que la vida útil promedio de un aerogenerador es de 20 años o 100,000 horas de funcionamiento y el tiempo

de recuperación energética es pequeño (Villarrubia López, 2013), se podría energizar un proyecto de electrólisis de manera sustentable y sostenible.

Sin embargo, la energía eólica requiere de grandes extensiones de terreno en los cuales se pueda construir, en el caso de los parques eólicos de gran capacidad. En caso de que no se pudiera construir un parque de gran capacidad no se favorecería a los factores de la economía de escala, lo que elevaría el costo. Todo esto sin considerar que la disponibilidad del viento es variable y aleatoria. Además, de requerir un sistema de baterías o un sistema que funcione como respaldo en periodos de baja o una hibridación con un sistema de energía solar.

En México el potencial eólico ha aumentado de 13 estados y 6000 MW a 15 estados y 7000 MW, esto de parques eólicos de gran capacidad. En la Figura 21 se pueden ver los distintos parques eólicos, de México, y su capacidad asociada.



**Figura 21 Parques eólicos en operación, en México, 2022, tomado de (Asociación Mexicana de Energía Eólica, 2018)**

A pesar de que los parques eólicos tienen unos requisitos muy particulares en cuanto a la extensión de espacio que necesitan, la lejanía de centros urbanos y bajo impacto a la fauna y flora local, son situaciones casi negligibles en un contexto de baja potencia. Es decir, con generadores de baja capacidad, como lo podrían ser los aerogeneradores verticales. Estos son otra posibilidad que tiene la energía eólica para ser aprovechada. Los aerogeneradores verticales suelen ser de baja potencia, 300 W, pero carecen de las desventajas que presentan los de mayor tamaño. Por lo que los aerogeneradores verticales pueden operar con muy poco viento, son de menor tamaño, producen ruido menor a 20dB y no hay riesgo para la fauna o flora local (Tecnológico Nacional de México, 2022).

## 2.2 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es aquella, que como lo indica su nombre aprovecha la radiación

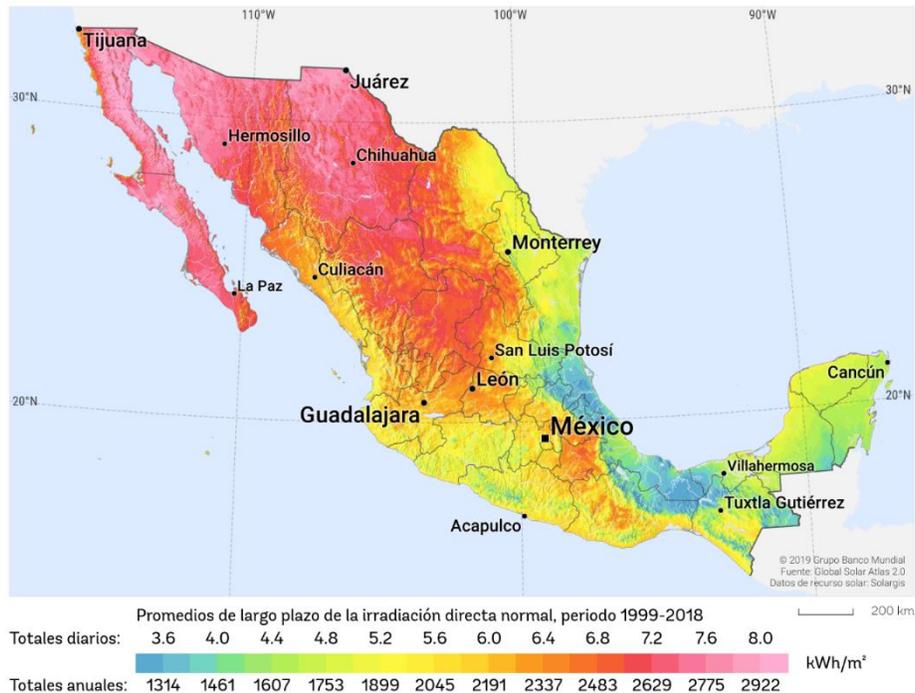
solar para la generación de electricidad. Esto permite el uso una fuente energética que es prácticamente inagotable, no contaminante, silenciosa. y gratuita. El uso de la energía solar para producir electricidad permite que sea útil en aplicaciones que requieren de la misma electricidad, trabajo mecánico o calor.

En México la energía solar ha ganado popularidad y aceptación gracias al potencial que exhibe, mostrado en la Figura 22 y Figura 23. En total, la energía solar aporta 8,068 MW a la matriz energética mexicana en 2023 (Secretaría de Energía, 2021).



**Figura 22 Plantas de energía solar, marcadas en amarillo, en México para 2023. Tomada de (Asociación Mexicana de Energía Solar, 2023).**

La ubicación de las centrales solares en México se muestra en la Figura 22, la cual se contrasta con la intensidad de la radiación solar de la Figura 23, que muestra la irradiación que reciben los distintos estados de México.



**Figura 23** Mapa de irradiación directa normal en México, tomado de (SOLARGIS, 2017)

La generación eléctrica puede ser por medio de dos métodos: conversión indirecta a través de calor y conversión directa. Cualquiera de los dos métodos aprovechan la radiación que el Sol irradia; Sin embargo, el primero consta de un sistema que funciona como una central termoeléctrica convencional de ciclo Rankine que genera vapor a altas temperaturas con concentradores solares y el vapor mueve una turbina conectada a un generador. Este tipo de centrales, termosolares, son pocas en México, siendo que sólo aportan 14 MW a la matriz energética (Secretaría de Energía, 2021). Mientras que la conversión directa utiliza celdas fotoeléctricas que hacen la conversión energética de una fracción de la radiación solar a electricidad CD (Jutglar Banyeres, 2012) y aportan 8,054 MW a la matriz energética mexicana en 2023 (Secretaría de Energía, 2021). Las centrales termosolares son escasas en México, como se indicó con anterioridad, tanto que sólo hay una sola. Esta es la central termosolar de Agua Prieta II con una capacidad de 14 MW, localizada en Agua Prieta, Sonora (ABENGOA, 2019). Mientras que las plantas de conversión directa en México representan la mayoría de las centrales solares. Estas están indicadas en la Figura 22 y sus capacidades varían entre 0.1 a 300 MW de generación eléctrica. La planta con mayor capacidad es La Pimienta con una capacidad de 300 MW, en Campeche (Asociación Mexicana de Energía Solar, 2023).

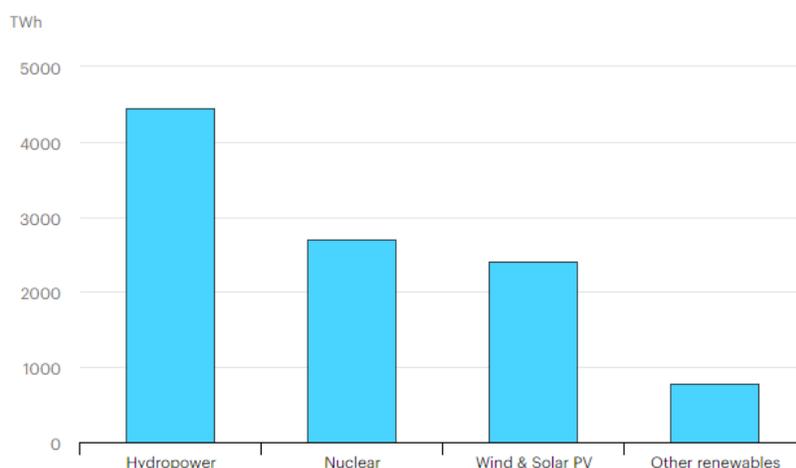
La energía solar es un mercado en crecimiento constante, principalmente por los incentivos financieros que otorga a los usuarios y el hecho de que la fuente energética primordial es gratuita. Sin embargo, es necesario señalar que la energía solar tiene una disponibilidad de 92.44% a 95.69% (Nallapaneni Manoj, Srikar, & Jagathpally Bhagwan, 2018). Esta cifra es prometedora, por sí misma; sin embargo, para que se entienda el contexto se debe de analizar en paralelo al factor de planta asociado a la central solar. El factor de planta de las centrales solares de México es de 16% (IMCO, 2022) y la capacidad instalada

llegaría a ser de 20,890 MW, de acuerdo con la Tabla 26. Esto indica que sólo se produciría el 16% de dicha capacidad instalada.

Una vez que se toma en cuenta la disponibilidad, el factor de planta de los parques solares y el hecho de que se requieren grandes extensiones de espacio para colocar los parques, la generación eléctrica a partir de energía solar es una operación costosa y de gran volumen.

## 2.3 ENERGÍA HIDRÁULICA

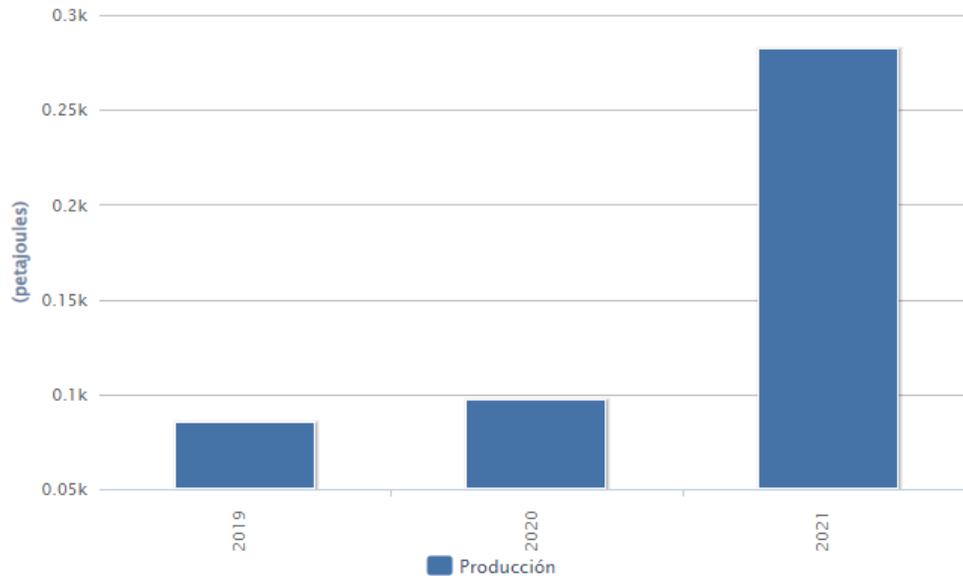
La energía hidráulica es aquella energía que se obtiene de la transformación de la energía potencial del agua, reservada en presas de gran altitud, por medio de una turbina hidráulica conectada a un generador eléctrico. Debido a la sencillez de la premisa bajo la que actúa este tipo de energía, que es sólo aprovechar el movimiento del agua conforme desciende de vuelta al océano, la capacidad existente abarca desde los pocos watts hasta los mega watts (Ahenkorah, y otros, 2012). La capacidad mundial, existente, de energía hidráulica es de 1,392,598 MW (IEA, 2022); por lo que es la energía renovable que aporta la mayor cantidad de electricidad, Figura 24.



**Figura 24** Generación eléctrica de baja emisión por tecnología, 2020

Las plantas hidroeléctricas, además de ser grandes contributivas a las matrices energéticas en muchos países (IRENA, 2023), tienen la flexibilidad suficiente para moderar su generación eléctrica. Así, la energía hidráulica puede ajustarse rápidamente a los cambios de la demanda y ayudar a subsanar a otras energías, como la solar o eólica, en momentos de baja producción por factores mitigantes asociados (IEA, 2021).

Mientras tanto, en México, la energía hidráulica produce, aproximadamente 282,180 PJ (Secretaría de Energía, 2021) y ha tenido un desarrollo notorio desde 2019, tal como se muestra en la siguiente gráfica hecha con datos de (Secretaría de Energía, 2021). Además de que esta energía se utiliza como energía punta, para satisfacer demandas superiores a la carga base y poder regular fácilmente la energía en la red de transmisión.



**Figura 25 Generación eléctrica a partir de energía hidráulica en la matriz energética mexicana, 2019-2022.**

Realizar un sistema de producción de  $H_2$  verde con energía hidráulica eliminaría la necesidad de solucionar las cuestiones de disponibilidad de materia prima. Ya que la electrólisis requiere de agua y las centrales hidroeléctricas tienen, a menudo, cantidades bastas de dicho recurso hídrico. Sin embargo, se requerirían de sistemas de filtrado, como lo podrían ser plantas de osmosis inversa y un equipo desionizante para que el agua estuviera en las condiciones de pureza necesaria. Aunque este es un requerimiento en todos los casos, la pureza del agua.

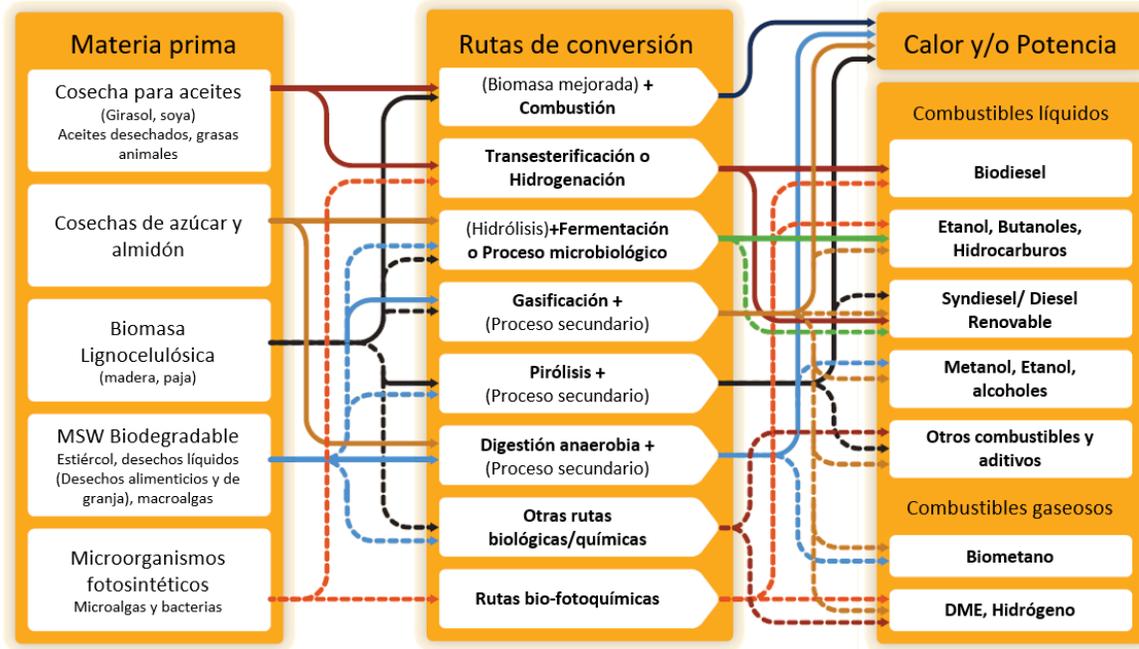
## 2.4 BIOMASA

La bioenergía es una energía alterna y renovable que destaca por su uso de materia orgánica, biomasa, como cultivos y desechos agrícolas, forestales o urbanos para la producción de electricidad, calor y biocombustibles. La distinción de materia orgánica se hace más adelante en la Tabla 14, realizada con información de (Islas Samperio & Matínez Jiménez, 2010) y (Faaij, y otros, 2012). El impacto que la bioenergía puede tener sobre el calentamiento global, particularmente en la mitigación de gases de efecto invernadero, dependerá del desarrollo sustentable de los recursos y sistemas en uso. En caso que se respete la sustentabilidad del desarrollo se puede tener un impacto significativo, como lo han tenido los sistemas de cultivos perennes. De esta forma, la biomasa, a partir de la conversión de materia orgánica en convertidores de desecho ofrece una reducción del 80% al 90% de emisiones a comparación de las alternativas fósiles (Faaij, y otros, 2012). Otra de las razones que vuelven a la bioenergía atractiva, es la capacidad de crear combustibles con densidades energéticas competitivas contra aquellas de los derivados del petróleo. Añadiendo a esto, a los biocombustibles se les puede almacenar de la misma manera que los combustibles fósiles.

Tabla 14 Tipos de bioenergía disponibles según una clasificación de su eficiencia energética

<b>TIPO DE BIOMASA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Biomasa tradicional de baja eficiencia</b>	Está constituida por materia orgánica como madera, hierba o estiércol y se usa para cocinar, iluminación o acondicionamiento de espacios. Este tipo de biomasa es, en su mayor parte, aprovechada a través de combustión. De tal forma que tiene impactos negativos serios en la salud y condiciones de vida de los usuarios.
<b>Bioenergía moderna de alta eficiencia</b>	La generación de biocombustibles, calor y electricidad, algunas veces en modalidad de cogeneración para los últimos, está alimentada por sólidos, líquidos y gases con mejor aptitud para ser portadores de energía.
<b>Bioenergía de alta energía y eficiencia</b>	Comúnmente está asociada al sector industrial del papel, productos de madera y carbón entre otras. A menudo, se utiliza este tipo de biomasa para el calentamiento de procesos industriales y, en caso de requerirlo, producir electricidad.
<b>Plantaciones energéticas</b>	Son plantaciones, preferiblemente de tipo forestal para uso industrial intensivo, crecimiento rápido que son recolectadas para su aprovechamiento como biomasa.
<b>Biocombustibles de primera generación</b>	Combustibles como el bioetanol y el biodiesel basan su producción en materia prima de consumo alimenticio, granos y semillas respectivamente.
<b>Biocombustibles de segunda generación</b>	Son combustibles cuya obtención depende de la lignocelulosa proveniente de la biomasa leñosa y de los residuos agroindustriales. Son atractivos porque su producción es independiente de la cadena de suministros alimenticia.
<b>Biocombustibles de tercera generación</b>	Son combustibles que son sintetizados a partir de algas y microorganismos capaces de almacenar compuestos similares a los que constituyen al petróleo. De esta forma se pueden producir biocombustibles como el biodiesel.

Así como hay múltiples posibilidades para identificar a la biomasa por la eficiencia energética que ofrece, también se debe de identificar la materia prima y los productos en los que puede finalizar un proceso de conversión energética. Es por eso que se muestra en la Figura 26 la materia de origen que alimenta un proceso de conversión y los productos en los que puede resultar. La factibilidad económica que tiene la bioenergía es poder utilizar recursos en fase sólida, líquida o gaseosa. Esto hace de la bioenergía un recurso energético universal, limpio y de gran alcance, siempre y cuando se respete la sustentabilidad de la operación (Islas Samperio & Matínez Jiménez, 2010).



**Figura 26 Vista esquemática de una variedad de rutas comerciales (líneas sólidas) y en desarrollo (líneas punteadas) de la fuente de biomasa, proceso de conversión y el producto resultante. Los productos comerciales están indicados con un asterisco.**

A nivel mundial, en momentos recientes, el uso de bioenergía ha tenido una expansión notoria en países que tienen fuentes viables de biomasa, con exceso de producción y políticas flexibles y disponibles. Tal fue el caso de Argentina, India e Indonesia en 2022 (IEA, 2023). Sin embargo, fue el caso contrario en otros países, en los que el precio de los biocombustibles se incrementó. Por eso es que muchos planes de desarrollo para los bioenergéticos fueron pospuestos o se retrasaron la implementación de políticas que exhortaban su uso.

Según la información de la IEA, el uso de biocombustibles ayuda a reducir el consumo de combustibles fósiles por 2 millones de barriles de petróleo diarios. Además de representar una disminución en el uso de combustibles fósiles, se debe de hacer notar que la mayoría de estos biocombustibles se producen a nivel local. Es por eso que los países productores pueden evitar pagos de importación, lo que pudiera llegar a acumularse hasta 90 billones USD (IEA, 2023).

La mayor parte del crecimiento esperado, del mercado bioenergéticos, será en economías emergentes como Brasil, India o Indonesia (IEA, 2023). Las características que estos tres países comparten son: una amplia reserva de materia prima, con capacidad de sobreproducción, costos de producción bajos y un paquete de políticas que fomenten el crecimiento de la demanda.

En México, la bioenergía tiene una presencia considerablemente menor al resto de las energías renovables. De tal forma que la capacidad instalada en la matriz energética mexicana es apenas de 408MW, como se muestra en la Tabla 27 (Centro Nacional de Control de Energía, 2023).

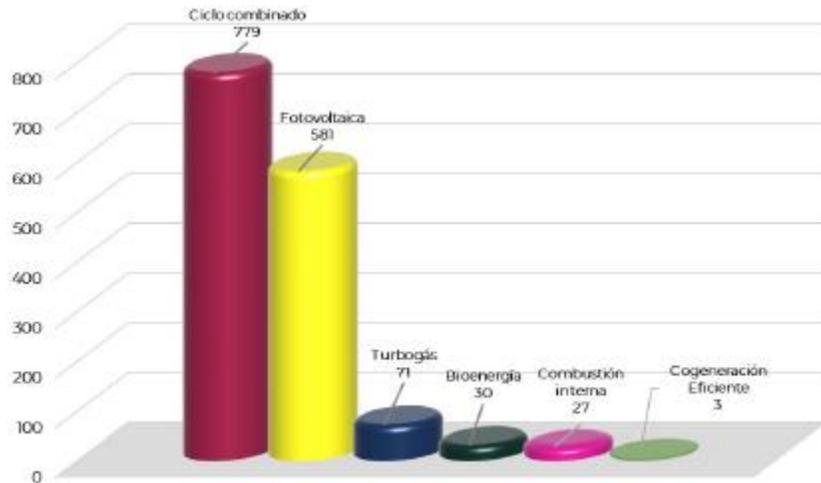
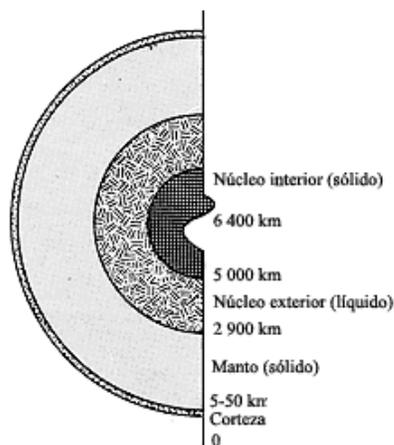


Figura 27 Adiciones a la capacidad instalada a la Red Eléctrica al 31 de diciembre de 2022 (MW) (Centro Nacional de Control de Energía, 2023)

## 2.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica ocupa un lugar central dentro de esta tesis, ya que está definida como la que energizaría la propuesta de una operación productora de  $H_2$  verde. Tiene las ventajas de carecer de intermitencias, a diferencia de otras energías renovables como la energía solar o eólica. Por lo tanto, es vital comprender desde un inicio el trasfondo geológico que permite la existencia de gradientes de temperaturas útiles en el suelo.

Inicialmente, se debe de reconocer que toda energía presente en el Universo proviene del Big Bang. La energía liberada en este evento produjo todo lo que existe. En ciertas ocasiones, por el proceso de acreción planetaria, algunas cantidades de masa se agruparon y fueron aumentando su tamaño. En estos cuerpos de masa creciente fueron sujetos a fenómenos de difusión, regidos por una diferencia de densidad, en los que los materiales más densos se acumularon en el centro del cuerpo y los materiales menos densos se dirigieron a las partes más cercanas a la superficie. En una instancia muy particular, la Tierra se formó con las capas que se muestran en la Figura 28 tomada de (Prol Ledesma, 1996).



**Figura 28 Estructura interna de la Tierra con las capas determinadas por medio de datos sísmológicos (Prol Ledesma, 1996).**

Sin embargo, la composición y forma de las capas de la Tierra, no es uniforme ni homogénea. De tal forma que la corteza está compuesta por placas, estas placas son parte central de la teoría de tectónica de placas que es la teoría que ha estructurado el pensamiento moderno de la estructura de la Tierra y los mecanismos geológicos que toman lugar en ella. El mecanismo geológico primordial de la teoría de placas es el movimiento relativo que existe entre las placas, estas componen toda la corteza, dicho movimiento puede llevar a situaciones en que dos o más placas hagan contacto y sufran esfuerzos por compresión o tensión (United States Geological Service, 2014). Para aliviar los esfuerzos provocados por el contacto las placas sufren fenómenos de plegamiento, empuje, subducción y engrosamiento para aliviar los esfuerzos por compresión; mientras que los esfuerzos por tensión se alivian por procesos de desprendimiento, rompimiento paulatino y adelgazamiento (DiPippo, 2012).

De los fenómenos mencionados, el que es más importante para la aparición de sitios de geotermia de alta temperatura es la subducción (DiPippo, 2012). La subducción se da cuando son placas hacen contacto y aquella con mayor masa y densidad provoca que la segunda placa se deslice por debajo de la primera. De tal forma, la subducción provoca que el calor emanado por el contenido semisólido del manto se filtre a regiones delgadas, fracturadas o con anomalías, provocando así la presencia de un gradiente de temperatura geotérmico<sup>1</sup>.

La geotermia tiene una presencia global debido a la naturaleza de su origen, como se explicó al mencionar la teoría de tectónica de placas. La distribución de las placas, particularmente de sus límites, ha dado lugar a actividad geotérmica en distintas partes del mundo y de diferentes formas. La diferencia principal radica en cómo se usa, ya que se puede utilizar el recurso geotérmico, esto es una concentración de calor presente en la corteza que

---

<sup>1</sup> Para que un gradiente geotérmico sea útil el gradiente debe de ser mayor a 3.1°C por cada 100 metros de profundidad (DiPippo, 2012).

puede ser extraído y es económicamente viable, para ser aprovechado en usos indirectos o directos. El factor del cual depende el uso de la energía es la temperatura requerida para la aplicación deseada. Las aplicaciones para las cuales la geotermia es viable se muestran en la Figura 29, en la que se muestran los usos directos e indirectos. El uso indirecto de la geotermia se refiere a que la energía no se utiliza directamente desde la fuente, sino que se realiza una transformación a electricidad, esta es una restricción que dificulta su uso (Prol Ledesma, 1996). Sin embargo, tal como se muestra en el Diagrama de Lindal en la Figura 29, para compensar la dificultad que presenta su uso de forma directa, la geotermia tiene una versatilidad impresionante cuando se trata de usos directos. Los usos directos de la geotermia son aquellos en los que se utilizan el recurso geotérmico sin ningún proceso de conversión energética intermedio.

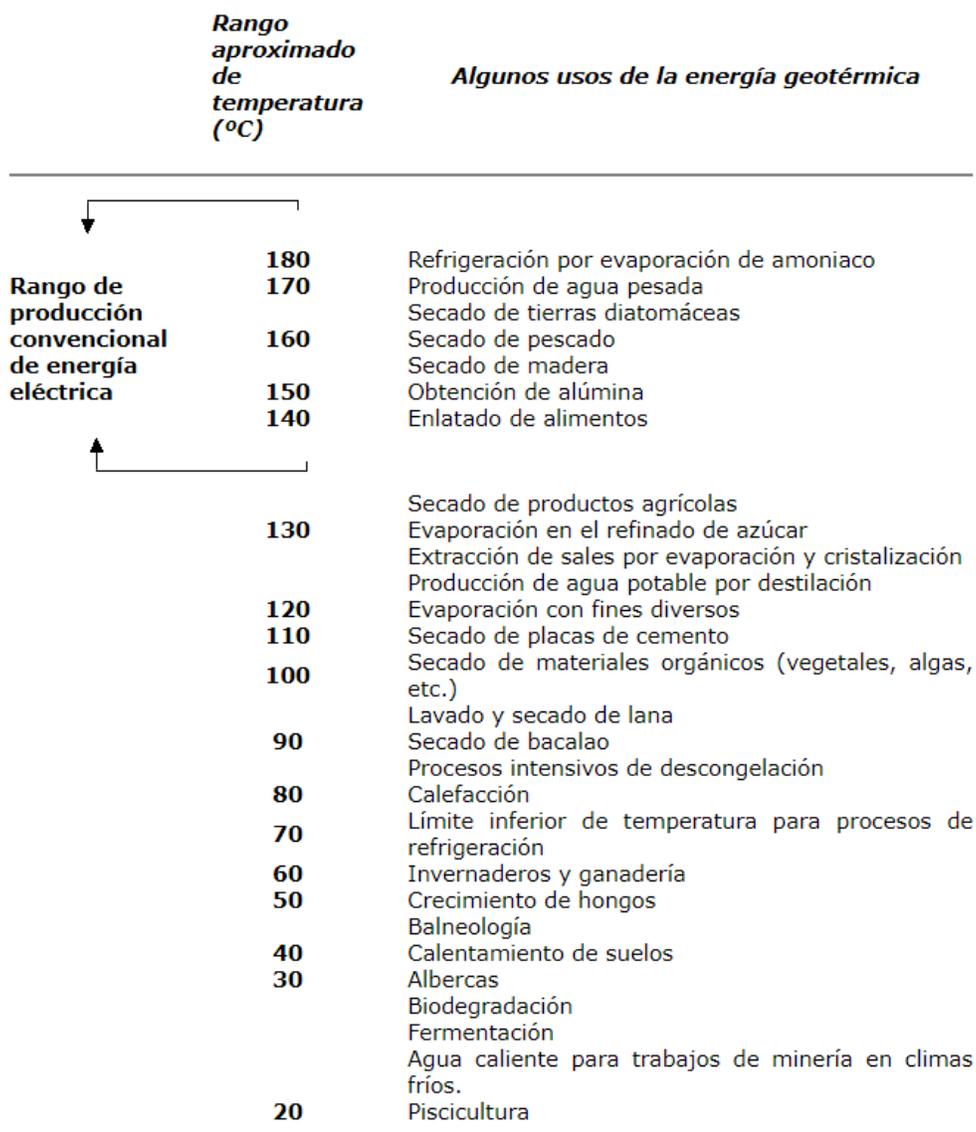
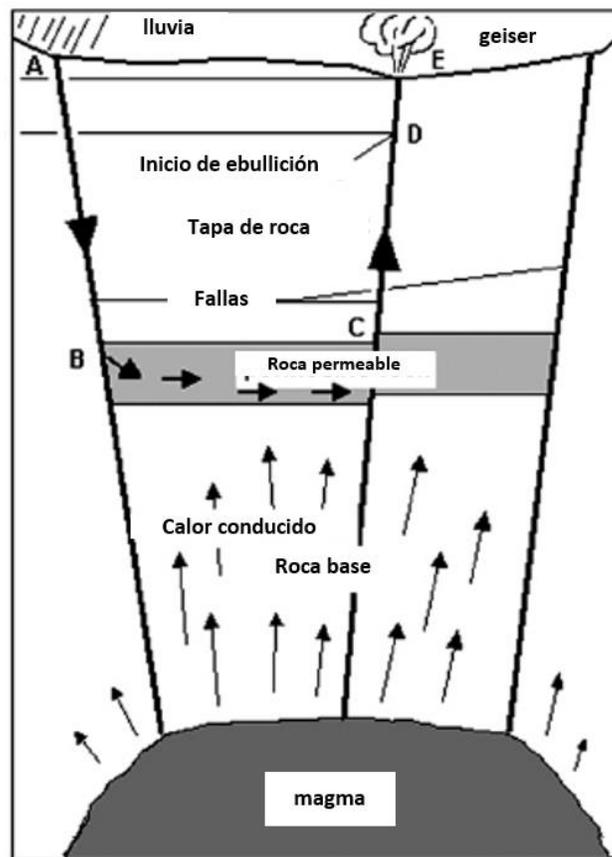


Figura 29 Diagrama de Lindal (Prol Ledesma, 1996)

### 2.5.1 RECURSO GEOTÉRMICO HIDROTÉRMAL

El tipo de recurso geotérmico más común de encontrar es el recurso geotérmico hidrotermal. Se le denomina de esta forma a todo aquel recurso geotérmico que necesita de un fluido de transferencia (agua), una fuente de calor y permeabilidad de la reserva para generar electricidad (United States Geological Service, 2016). Los sitios con un recurso geotérmico hidrotermal convencional tienen esas tres características de forma natural. Pero para que un sitio sea de provecho requiere un mecanismo de recarga fiable (DiPippo, 2012).

Entonces, un campo que albergue un recurso geotérmico hidrotermal, digno de explotar, tendrá todas las características mencionadas anteriormente. Incluso si llegara a no poseer alguna, existen medios artificiales por medio de los cuales se pudiera remediar dicha situación. De cualquier manera, este tipo de pozos se comportan de la misma manera: el calor del manto se conduce a lo largo de una base rocosa hasta llegar a una cama de roca porosa, en la cual está el fluido de transferencia y recibe el calor hasta cambiar de fase para manifestarse en la superficie. El proceso que se describió puede observarse en la Figura 30 tomada de (DiPippo, 2012)



**Figura 30 Modelo esquemático de un sitio con recurso geotérmico hidrotermal**

Los recursos geotérmicos disponibles para una explotación comercial, al menos hasta 2007 eran sólo de este tipo. Sin embargo, existen recursos de naturalezas diferentes, los cuales también son viables para su explotación.

## 2.5.2 RECURSO GEOTÉRMICO SECO

La segunda alternativa que se explicará será una variación del recurso geotérmico hidrotermal. Estos son sitios en los que puede encontrarse una temperatura elevada, útil para la explotación comercial y sin humedad. A este tipo de recurso geotérmico se le denomina como recurso geotérmico seco. El funcionamiento de uno de estos sitios es similar al que se muestra en la Figura 30, con la única diferencia que el agua no se encuentra inicialmente. La falta de un fluido de transferencia exige que realicen operaciones como la inyección de agua a altas presiones para crear o agrandar fracturas en la base rocosa. Una vez que la fractura de la base rocosa rinde la porosidad y volumen suficiente, se hace un pozo que intercepte a la reserva recién creada. Así se crea un lazo cerrado entre la inyección de agua, pasando por la reserva que calentará el fluido de transferencia y la salida de la reserva. Pero existe la posibilidad de perder un cierto porcentaje del agua inyectada por fracturas que no estén conectadas al pozo de salida. En ese caso se necesitaría una reserva de agua de reposición para mantener activo al recurso geotérmico.

## 2.5.3 BAJA, MEDIA Y ALTA ENTALPÍA

En la actualidad, gracias a los avances tecnológicos se han superado las situaciones problemáticas que afligían a la geotermia, lo que ha permitido que la energía geotérmica tenga un aumento constante, como se muestra en la Figura 31. Esto ha hecho que el rango de temperaturas en los que se puede explotar un recurso geotérmico sea amplio, o bien que se puedan explotar en cascada.

La clasificación de recursos geotérmicos a partir de sus niveles energéticos es de suma importancia en el estudio y aprovechamiento de fenómenos geotérmicos, esta clasificación facilita la clasificación de usos posibles para cada nivel energético que posee el recurso geotérmico. De tal forma se tienen las siguientes clasificaciones, de acuerdo con (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008) por entalpía: baja, media y alta.

### 2.5.3.1 BAJA ENTALPÍA

Este tipo de manifestaciones están clasificadas hasta los 90°C. Los usos más comunes para este tipo de clasificación son de aprovechamiento directo. Los usos directos de la geotermia están enfocados en aprovechar el calor disponible del pozo para diferentes tipos de proyectos, tal como se muestra en el Diagrama de Lindal en la Figura 29.

### 2.5.3.2 MEDIA ENTALPÍA

Los sitios de media entalpía se encuentran dentro de un rango de temperaturas entre 90°C y 150°C. Este rango de temperaturas corresponde a generación energética de baja demanda, el secado de materiales orgánicos e inorgánicos o en proyectos de desalinización.

### 2.5.3.3 ALTA ENTALPÍA

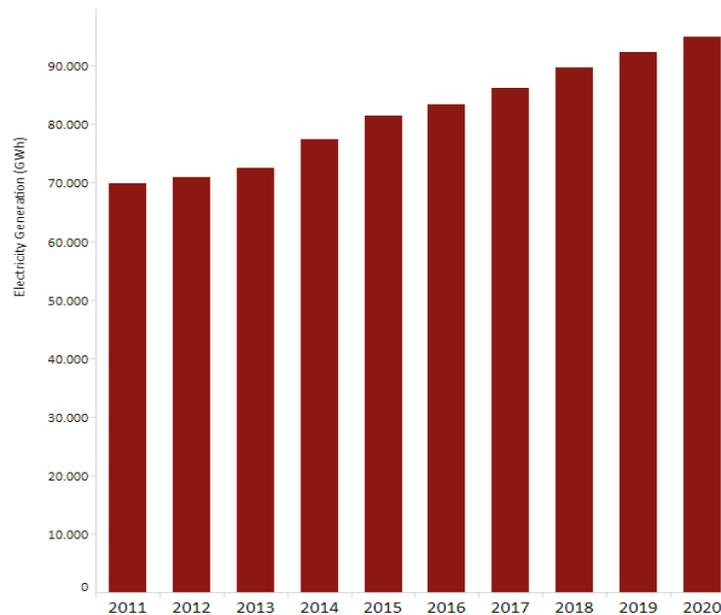
Por encima de los 150°C se encuentra la clasificación de alta entalpía, como se muestra en el Diagrama de Lindal, es el rango en el que se acostumbra producir energía

eléctrica de alta demanda.

#### 2.5.4 USOS EN CASCADA

Uno de los beneficios de la energía geotérmica, en materia de aplicación, es la posibilidad de aprovecharla en “cascada”. Los sistemas en cascada aprovechan integralmente la energía y se aprovechan los diferentes niveles de temperatura (Aviña Jiménez, 2018). Con los usos en cascada se pueden energizar diferentes procesos que requieren distintas temperaturas, todo en un mismo sistema, evitando pérdidas energéticas. Esto significa que se pueden energizar distintos procesos. Conforme la temperatura del fluido de trabajo va disminuyendo, la aplicación cambiara de acuerdo con la clasificación recién mencionada.

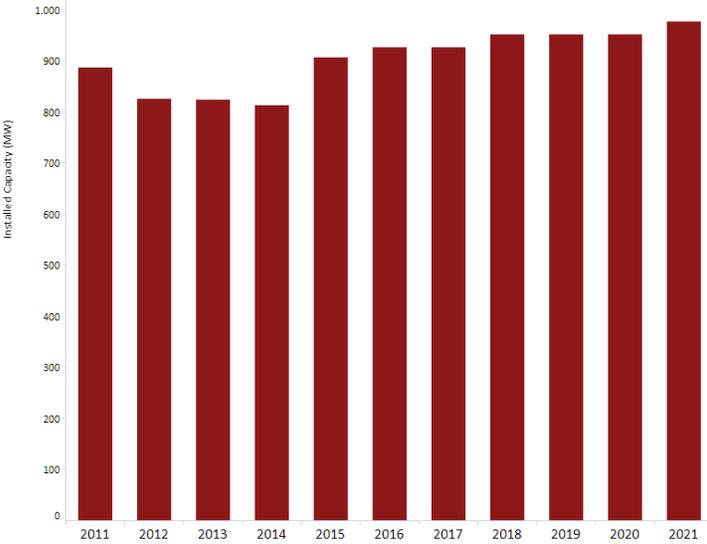
La energía geotérmica, en los últimos años, ha tenido un crecimiento notorio como se muestra en la Figura 31 tomada de (IRENA, 2022). En 2020 la generación eléctrica en el mundo se acumulaba por encima de los 90,000GWh. Las plantas que generan esta energía eléctrica tienen coeficientes de disponibilidad de 90% en promedio (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008). Ya que, de acuerdo con (Aviña Jiménez, 2018), la energía geotérmica no tiene periodos de intermitencia lo que la hace más económica que otras energías renovables, a diferencia de otras energías renovables, como se mencionaba antes. De tal manera, la energía geotérmica podría estar aportando energía durante todo el año sin interrupciones. Estas afirmaciones son respaldadas por (IRENA, 2022).



**Figura 31** Tendencia de generación eléctrica de todos los países con actividad geotérmica, 2011-2020. (IRENA, 2022).

Mientras tanto, en México, la capacidad instalada es de 958MW, de acuerdo con la Figura 32. Simultáneamente, la energía producida a partir de proyectos energizados con geotermia es de 4412GWh, hasta 2022 (Centro Nacional de Control de Energía, 2023). A pesar de la tendencia que se observa a escala mundial, en México no se espera que haya un

crecimiento en la capacidad instalada de acuerdo con (Global Geothermal Alliance, SF). Se espera que a capacidad instalada se estanque en los 958MW, hasta el 2024 según la Alianza Global de Geotermia.



**Figura 32 Capacidad instalada de energía geotérmica en México. (Global Geothermal Alliance, SF)**

Por otra parte, la capacidad conjunta de usos directos de la geotermia en México es de 4183.89 TJ por año (Global Geothermal Alliance, SF). Esta capacidad se divide entre acondicionamiento de espacios, aplicaciones agrícolas, balnearios y bombas de calor geotérmicas.

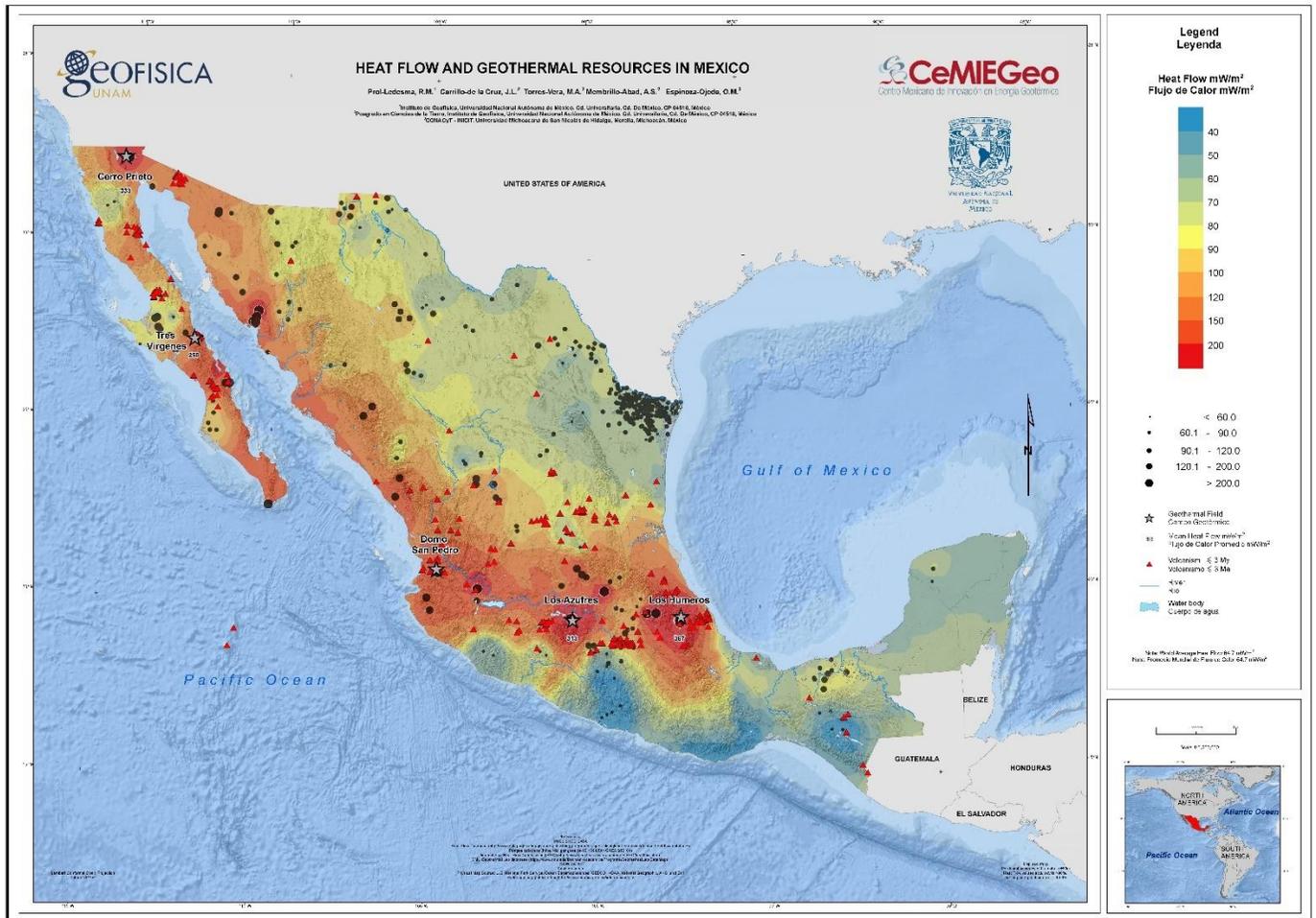


Figura 33 Mapa de flujo de calor en México, tomado de (Prol-Ledesma, 2018)

En resumen, el potencial geotérmico de México se puede notar con el mapa de la Figura 33 tomado de (Prol-Ledesma, 2018), el cual muestra los sitios de alta entalpía siendo aprovechados por las plantas geotérmicas de: Cerro Prieto, Tres Vírgenes, Domo de San Pedro, Los Azufres y Los Hornos. Dichas plantas utilizan recursos geotérmicos de vapor saturado con suficiente temperatura para ser clasificados como alta entalpía.

Sin embargo, el aprovechamiento de los sitios de alta entalpía reduce las posibilidades de instalación de más plantas en México. Debido a que la mayor cantidad de recursos, como lo muestra el mapa de flujo de calor, son de media y baja entalpía. Por lo tanto, se debe abordar una tecnología que permita el aprovechamiento de dichos recursos.

## 2.6 CICLOS ORC Y FUENTES DE ENERGÍA

Los ciclos ORC son ciclos de potencia que comparten algunas características con los ciclos Rankine convencionales. A pesar de eso, tienen diferencias notorias que los hacen operar bajo condiciones y requerimientos muy diferentes a la norma establecida para ciclos Rankine. En primera instancia, la razón por la que existen los ORC es para que sea técnica y económicamente factible la generación eléctrica a temperaturas moderadas (Macchi, 2017),.

particularmente en un rango de temperaturas correspondientes a baja y media entalpía identificado anteriormente. Otra diferencia que existe entre los ciclos Rankine convencionales y los ORC es el fluido de trabajo utilizado. Mientras que los ciclos Rankine utilizan agua, los ORC usan fluidos orgánicos<sup>2</sup>. De esta forma, los ORC son reconocidos como la mejor forma de generación eléctrica a partir de fuentes energéticas de baja y media temperatura (Herath, Wijewardane, Ranasinghe, & Jayasekera, 2020).

Al tratarse de un ciclo de potencia, vale la pena recordar los tipos de ciclos y procesos que pueden presentarse. La clasificación de ciclos de potencia depende de la fase del fluido que se utiliza y de la presencia de la recirculación del mismo fluido de trabajo. Con tales distinciones se tienen los ciclos de gas y vapor, así como los ciclos abiertos y cerrados, respectivamente (Cengel, 2012).

### 2.6.1 EQUIPOS Y FUNCIONAMIENTO DE UN ORC

Una vez que se ha dado una introducción de lo que son los ORC es momento de ver cómo están compuestos. Para que un ORC sea funcional se requieren, principalmente, cuatro clases de componentes (Astolfi, 2017).

1. Intercambiadores de calor
2. Bombas
3. Expansores
4. Unidades generadoras

En primer lugar, los intercambiadores de calor se utilizan para los procesos de: ingreso de calor, en este caso se le conoce a la unidad como “intercambiador de calor primario”; la liberación de calor al ambiente, este equipo es el “condensador”; y la recuperación interna de energía térmica disponible del vapor descargado por la turbina, en el “recuperador”. Las opciones de intercambiadores de calor son increíblemente amplias, tanto así que existen investigaciones y tesis que abarcan sólo temas concernientes a los intercambiadores. Por tal motivo, se incluyen en el ANEXOS DEL CAPÍTULO 2, EQUIPOS PARA UN ORC, algunas de las configuraciones que existen de intercambiadores de calor.

Después, las bombas son equipos que transfieren energía a un líquido para que este se pueda trasladar a través de la instalación. En el caso de los ORC, suelen ser bombas centrífugas de múltiples etapas, como la que fue usada en un proyecto de ciclo ORC diseñado por Grupo IIDEA. Más adelante se dará mayor protagonismo a este ORC, ya que sería el motor de la propuesta de esta tesis.

A continuación, los expansores son componentes de suma importancia, ya que es donde la energía de los fluidos es transformada en energía mecánica. El tipo de dispositivos

---

<sup>2</sup> Los fluidos orgánicos son aquellos que tienen mejor aptitud para las aplicaciones de temperaturas y presiones bajas, usualmente se les llama fluidos de trabajo. Esto es porque su punto de ebullición está por debajo del agua de acuerdo con (Marcelino Mejía, 2022)

que se usan con mayor frecuencia son las turbinas, que pertenecen a la categoría de turbomaquinaria. Las turbinas están compuestas por una secuencia de etapas, cada una de estas etapas se compone de un estator y un rotor. Las opciones técnicas existentes para la selección de una turbina son muchas, al igual que en el caso de los intercambiadores de calor. La clasificación que se usa es de acuerdo con el movimiento relativo del fluido respecto a la flecha de la turbina, por lo que hay de flujo axial y radial.

Finalmente, las unidades generadoras son equipos que convierten la energía mecánica, proveniente del expansor, en electricidad. Estos equipos operan a la misma frecuencia que la red eléctrica a la que se conectan. En el caso de México, la frecuencia a la que operarían equipos de esta naturaleza sería de 60Hz.

El funcionamiento de un ORC es mucho más simple, ya que el número de componentes es menor que los que se podrían esperar en un ciclo Rankine convencional. Esto es porque en los ORC se espera obtener una producción limitada, donde es raro que existan dos o tres etapas de expansión. Uno de los casos en los que se podría encontrar más de una etapa de expansión es en la geotermia, donde el costo elevado de la exploración y perforación harían rentable el uso de plantas más costosas y eficientes (Astolfi, 2017).

## 2.6.2 APLICACIONES Y DISPONIBILIDAD DE LOS CICLOS DE POTENCIA EN GEOTERMIA

Los ciclos de potencia se utilizan en el sector geotérmico, en plantas geotérmicas que se caracterizan por aprovechar una energía renovable y cuentan con un alto valor de factor de planta, disponibilidad y confiabilidad. Todo gracias a la explotación del calor subterráneo, tal como se ha señalado en apartados anteriores. Estos ciclos de potencia no son, necesariamente orgánicos. Tal designación proviene, como se indicó anteriormente del fluido de trabajo que se utiliza.

En este trabajo, por el alcance delimitado por el título y los objetivos del mismo, no se abordarán con gran detalle los ciclos directos. Sólo se mencionarán y se identificará el diagrama de flujo simplificado asociado a cada uno de ellos. Por los mismos motivos, los ciclos indirectos, los ciclos binarios orgánicos de baja entalpía, si tendrán una mayor presencia. De tal forma que, en este, se presente un diagrama de flujo particular y un análisis para este caso, que sirva como referencia más adelante

### 2.6.2.1 CICLOS GEOTÉRMICOS DIRECTOS

Los ciclos geotérmicos que se clasifican como directos son aquellos ciclos en los que el recurso geotérmico es utilizado como el único fluido de trabajo presente en el ciclo. Entonces, este tipo de ciclos permiten el flujo del recurso geotérmico a través de un circuito cerrado. Dicho circuito inicia en el pozo, pasa por el ciclo donde se expande en una turbina de vapor y después vuelve al pozo. A continuación, se presentan los ciclos directos de acuerdo con (Spadacini, Xodo, Quaiá, & Olona, 2017).

#### 2.6.2.1.1 CICLOS DE VAPOR SECO

Tal y como lo indica su nombre, los ciclos geotérmicos de vapor seco, operan en su

totalidad con vapor, usualmente sobrecalentado, proveniente del pozo. Este tipo de ciclos son de alta entalpía, lo que implica el uso de recurso geotérmico de alta temperatura, de acuerdo con la Figura 29 el rango 180°C a 140°C.

### 2.6.2.1.2 CICLOS CON FLASH

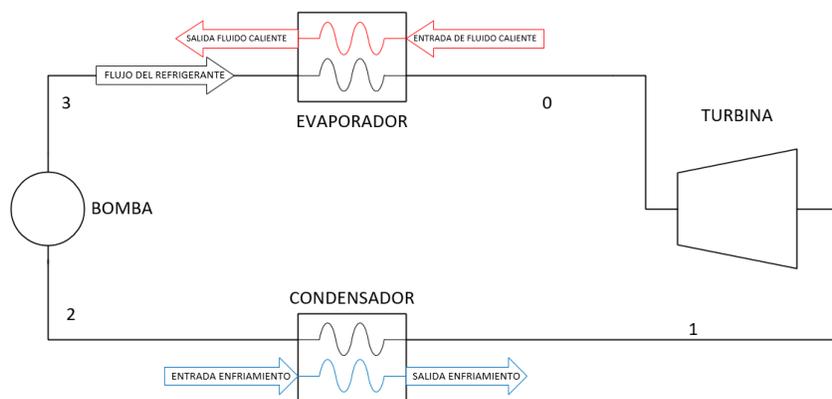
En el caso de pozos en los que el recurso geotérmico no sea únicamente vapor, es decir un recurso geotérmico hidrotermal, es necesario aplicar una operación adicional. Esta operación adicional es una llamada “flash”, que consta de la separación de las fases gaseosa y líquida del recurso geotérmico en una o varias etapas.

### 2.6.2.2 CICLOS GEOTÉRMICOS INDIRECTOS

A pesar de que el uso de vapor es una manera más simple de concebir la explotación de un campo con potencial geotérmico, no es el único. Debido a la existencia de gradientes de temperatura con diferentes clasificaciones, como se indicó en el apartado 2.5.3, la explotación de cada tipo de recurso es diferente. Mientras que los campos de alta entalpía pueden hacer uso de los ciclos directos, aquellos de mediana y baja entalpía recurren a otros métodos. Uno de estos métodos es el de los ciclos binarios orgánicos.

#### 2.6.2.2.1 CICLOS BINARIOS ORGÁNICOS

Los ciclos binarios orgánicos son ciclos que operan con dos fluidos, siendo uno de estos la salmuera del pozo como el fluido de alta temperatura del que se desea extraer energía y un fluido de trabajo orgánico con un punto de ebullición por debajo de los 100°C en condiciones estándar. A continuación, se presenta un diagrama simplificado de un ciclo binario orgánico en el que se muestra el flujo de fluido caliente (salmuera), a través del evaporador; el flujo del fluido de trabajo (ver LISTA DE FLUIDOS DE TRABAJO); y el flujo del fluido de enfriamiento, a través del condensador.



**Figura 34 Diagrama de flujo de proceso simplificado de un ciclo binario.**

El proceso inicia en desde la salida del evaporador, donde el fluido de trabajo ya fue calentado al punto que este se encuentra en estado de vapor sobrecalentado por el intercambio de calor con la salmuera proveniente del pozo. La energía del fluido de trabajo se libera en un proceso de expansión en la turbina. Después de salir de la turbina, el fluido de trabajo es

dirigido hacia el condensador donde se retira el remanente energético con otra transferencia de calor, esta vez con el fluido de enfriamiento, devolviéndolo a un estado de líquido saturado. En la bomba se comprime el fluido, se eleva la presión y el ciclo se repite. Para resumir esta explicación, a continuación, en la Tabla 15 se explica de acuerdo con la Figura 34, considerando que es un ciclo ideal.

**Tabla 15 Descripción de un ciclo binario orgánico ideal.**

<b>PROCESO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>0 - 1</b>	<b>Expansión isoentrópica</b> en una turbina de vapor, aquí es donde la energía mecánica se transforma en electricidad.
<b>1 - 2</b>	<b>Rechazo de calor</b> a presión constante dentro de un intercambiador de calor (condensador). El fluido de trabajo se encuentra en un estado de líquido saturado
<b>2 - 3</b>	<b>Compresión isoentrópica</b> del fluido de trabajo realizada por una bomba, la presión aumenta para igualar la presión en el evaporador
<b>3 - 0</b>	<b>Adición de calor</b> a presión constante dentro de un intercambiador de calor (evaporador). El fluido se encuentra en un estado de vapor sobrecalentado.

Ya que las idealizaciones hechas acerca de un ciclo binario orgánico son útiles para un primer análisis, no son útiles para un análisis más detallado. Por lo tanto, este capítulo finaliza considerando al ciclo binario orgánico como ideal y posteriormente se presentará el caso particular del ciclo binario modular IIDEA100 (CBM IIDEA00) en el capítulo 4 INTEGRACIÓN DEL CBM IIDEA100 CON UN ELECTROLIZADOR PEM.

## 2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2

De acuerdo a lo que se ha comentado hasta ahora respecto a los procesos de producción de  $H_2$ , es un requerimiento para que el hidrógeno sea considerado verde que sea producido por medio de electrolisis de agua. Este proceso sólo requiere de electricidad, lo que implica que dicha electricidad debe de ser generada por medio de algún otro energético. En este capítulo se exploraron las posibilidades presentes y se dio un breve análisis de aquellas que no tienen un papel principal en este trabajo. En el caso de México, existen muchas posibilidades gracias a la presencia de recursos naturales alternativos y el desarrollo continuo para su explotación, esto es así para la energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica.

Por último, en el caso particular de la geotermia, el aprovechamiento de recursos que no han sido explotados previamente en México, ya sea por falta de desarrollo tecnológico o desconocimiento. Pero con la implementación de unidades de ciclo binario se tiene acceso a un nivel de recursos, previamente ignorados, con una gran presencia en México. Además, con los beneficios inherentes que ofrece la geotermia, como su falta de intermitencias permitiría una producción con mayor continuidad; y se tiene la posibilidad de usos en cascada, para aprovechar al máximo los remanentes de energía calorífica en diferentes procesos y antes de descartar el recurso.

Para la aplicación que se desea, la producción de hidrógeno verde, la geotermia es una opción atractiva por su alta disponibilidad y flexibilidad en su implementación. En capítulos posteriores se revisarán los modelos matemáticos y el acoplamiento de los diferentes equipos requeridos para un caso de estudio para la producción de hidrógeno verde. Pero, a partir de lo que se ha expuesto en este capítulo, se muestra las posibilidades para la implementación de sistemas de producción de hidrógeno verde a partir de múltiples fuentes energéticas que, con tiempo, podrían resultar en sistemas de almacenamiento energético por medios químicos que no dependan de baterías de litio.

### 3 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA PEM

La electrólisis es un proceso que depende de un equipo denominado electrolizador, como se ha mencionado previamente; del cual, la unidad básica es la celda electrolítica. Dicha celda debe de ser estudiada y caracterizada para que se pueda conseguir una línea base del hidrógeno producido. Por lo tanto, en este capítulo se desglosará la cantidad de energía requerida para generar los **MODELOS PARA EL CÁLCULO DE VOLTAJE TOTAL** y los **MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS GASES PRODUCIDOS Y AGUA REQUERIDA**, a partir de

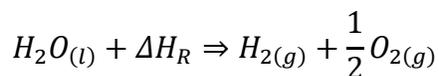
Considerando que el mecanismo de producción seleccionado para este trabajo es un equipo capaz de realizar la electrólisis del agua. Tal como su nombre, así como alguna noción rudimentaria lo podría sugerir, se necesita de energía eléctrica. Se sabe que un proceso electrolítico dentro de una celda electrolítica es una reacción química no espontánea descrita en la Tabla 3, así como en la Ecuación 4. Por lo tanto, al ser una reacción endotérmica, requiere de una cierta cantidad de energía para iniciar. Es por eso que en este capítulo se ahondará en los requerimientos técnicos y energéticos que una celda PEM requiere para su operación.

#### 3.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA UNA CELDA ELECTROLÍTICA

La caracterización de una celda electrolítica es necesaria para conocer la respuesta que se tendrá de la celda bajo condiciones de operación. Esta caracterización entrega la curva de polarización, la cual ofrece información acerca del desempeño de la celda y posiblemente a diferentes temperaturas. Esta curva de polarización se fundamenta en el balance de energía de la misma celda. A continuación, se presenta el balance energético de la celda, el cual está realizado para una celda sujeta a condiciones estándar y después para condiciones diferentes al estándar.

##### 3.1.1 BALANCE DE ENERGÍA

Antes de abordar el balance masa, es necesario realizar el balance de energía para establecer cuánta energía se necesita introducir al sistema para producir una reacción electrolítica. Para su funcionamiento, las celdas electrolíticas, sin importar su clasificación o designación son introducidas dentro de un circuito eléctrico para ser energizadas. Dicha cantidad de energía es igual a la entalpía de formación del agua líquida, esto es bajo condiciones estándar. Entonces, si se añadiera la energía requerida a la ecuación de electrólisis generalizada que se planteó en la Ecuación 4 se tendría la siguiente expresión:



**Ecuación 9 Ecuación general del proceso de electrólisis del agua**

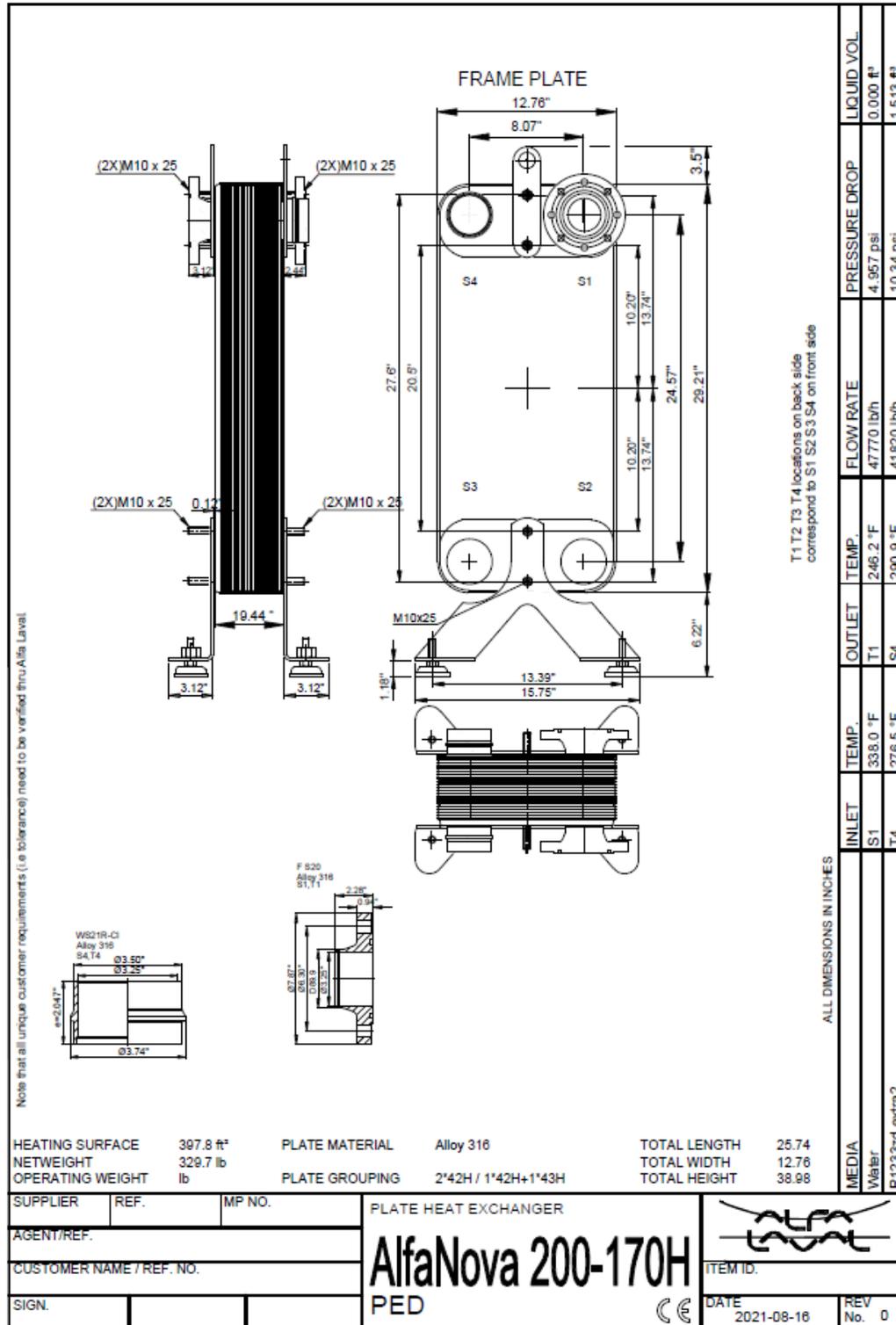
En un inicio se mostrará el balance de masa y energía para condiciones estándar (25°C y 1 atm). Por lo tanto, la energía necesaria ( $\Delta H_R^0$ ), para realizar la electrólisis se puede desglosar en calor  $Q$ , lo cual es igual a  $T^0 \cdot \Delta S_R^0$ , y demanda eléctrica de la reacción ( $\Delta G_R^0$ ), las cuales son dependientes de la temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción. La energía

libre de Gibbs estándar para la disociación de la molécula de agua y se utiliza, junto a la Ecuación 11, para calcular el trabajo reversible que es posible. Pero antes se deben de definir estas cantidades que se mencionan.

$$\Delta H_R^0 = \Delta G_R^0 + T^0 \cdot \Delta S_R^0$$

**Ecuación 10 Definición de la entalpía de reacción en función de la energía libre y el calor de la reacción**

Bajo condiciones estándar (1 atm y 25°C), las propiedades que tienen relevancia para el balance de masa y energía son las que se muestran en la Tabla 16 con valores de (Borgogno, 2010). Mientras que los cálculos correspondientes a las propiedades indicadas se encuentran en los



ANEXOS DEL CAPÍTULO 3, en la sección de MEMORIA DEL CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA CONDICIONES ESTÁNDAR DE LA REACCIÓN ELECTROLÍTICA.

**Tabla 16 Propiedades estándar de la reacción de electrólisis del agua**

PROPIEDAD	VALOR
Energía libre estándar de Gibbs $\Delta G^0$	$237 \frac{kJ}{mol}$
Entalpía estándar de la reacción $\Delta H_R^0$	$285.83 \frac{kJ}{mol}$
Entropía estándar de la reacción $\Delta S_R^0$	$163.18 \frac{J}{K}$

Continuando con el trabajo reversible, este se asocia al concepto de voltaje reversible, que tiene justamente ese significado. Es la diferencia de potencial mínima, que es necesaria aplicar, para producir un proceso reversible. Esto lleva a su definición, descrito en la Ecuación 11. En la misma ecuación, se introducen en el denominador dos términos que son constantes, “z” y “F”. Estos son, respectivamente, la cantidad de electrones (2 electrones) transferidos por molécula de hidrógeno y la constante de Faraday (96485 C/mol). El voltaje reversible de la celda se describe en la Ecuación 11, donde se muestra la Ley de Faraday, que relaciona la energía eléctrica necesaria para producir la disociación de las moléculas de agua a modo de una razón de conversión en cantidades molares (Chatenet, y otros, 2022).

$$U_{rev}^0 = \frac{\Delta G_R^0}{zF}$$

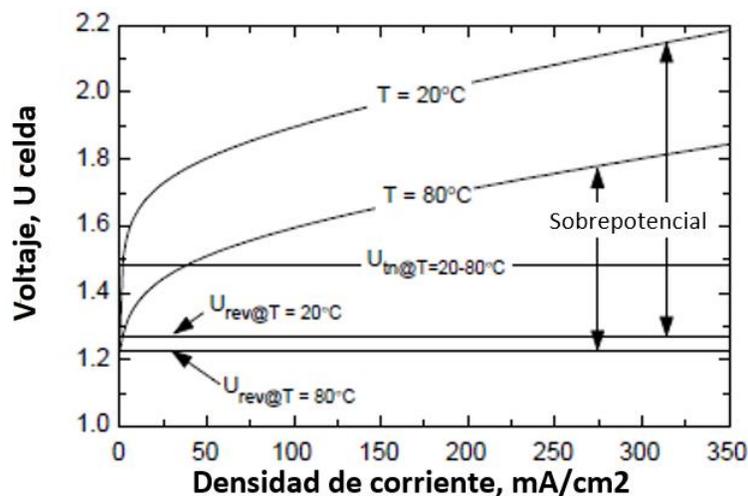
**Ecuación 11 Definición del voltaje reversible de celda, de acuerdo a la Ley de Faraday**

Sin embargo, el voltaje reversible no es la cantidad total de energía necesaria para que la reacción electrolítica sea viable, es necesario un sobrepotencial. La energía total demandada es equivalente al cambio de entalpía  $\Delta H_R$  de la Ecuación 10 y está relacionado al voltaje termoneutral de la celda, Ecuación 12 (Ulleberg, 2003).

$$U_{tn}^0 = \frac{\Delta H_R}{zF}$$

**Ecuación 12 Definición del voltaje termoneutral de la celda, de acuerdo a la Ley de Faraday**

Los valores del voltaje reversible y del voltaje termoneutral bajo las condiciones establecidas son, respectivamente:  $U_{rev}^0 = 1.229 V$  y  $U_{tn}^0 = 1.482 V$ . A pesar de que ambos valores están ligados a propiedades dependientes de la temperatura, sólo  $U_{rev}$  varía, como se puede apreciar en la Figura 35 que sirve como ejemplo del comportamiento esperado, tomada de (Ulleberg, 2003), dejando a  $U_{tn}$  casi como una constante.



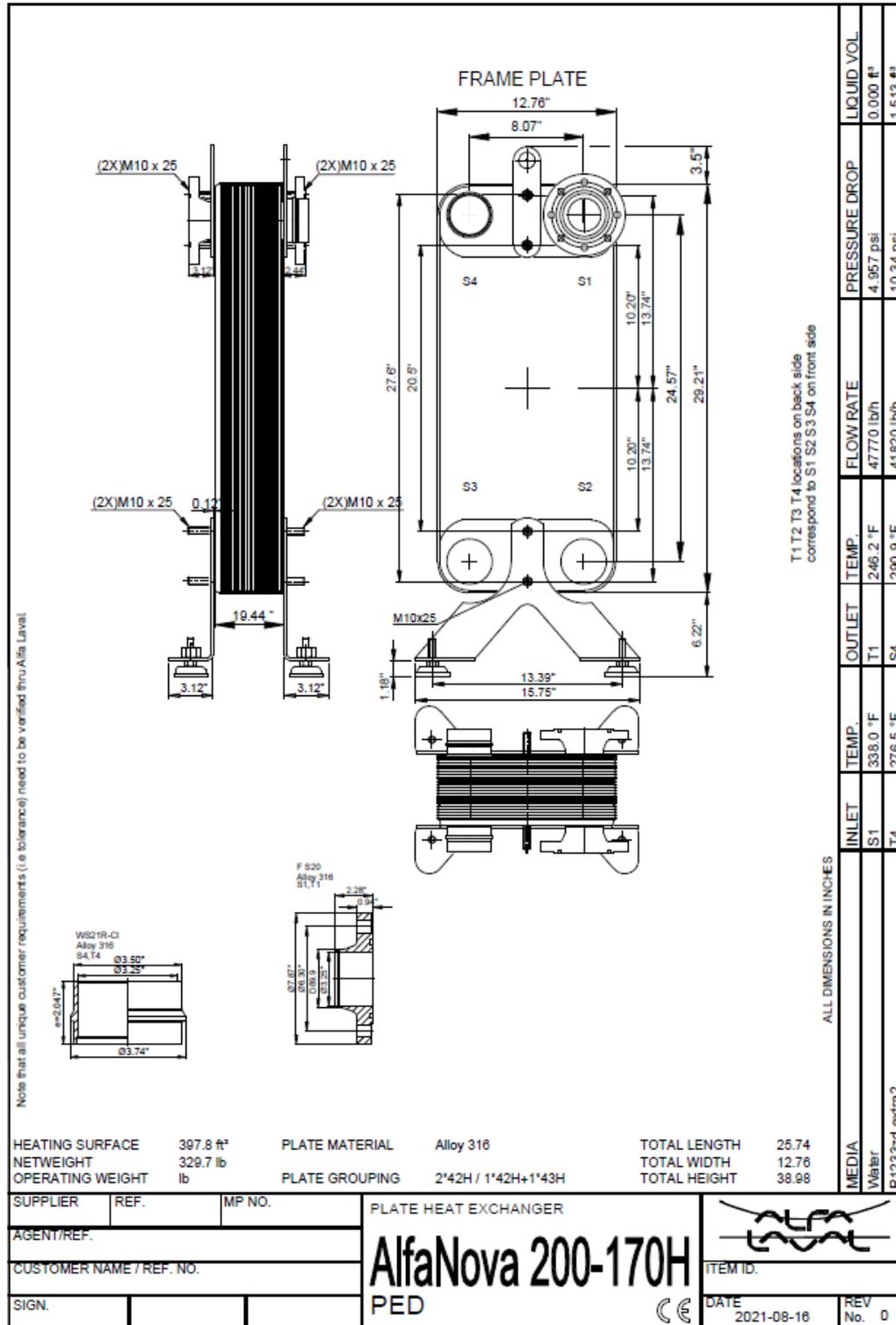
**Figura 35** Comportamiento de una curva típica I-U de un electrolizador a diferentes temperaturas

La falta de variación de  $U_{tn}$ , respecto a la temperatura, se debe a que el voltaje termonutral no incluye las irreversibilidades asociadas a los efectos de la temperatura. Por eso se mantiene estable, cerca del valor de 1.47-1.48 V (Ulleberg, 2003). De acuerdo con lo presentado en la Figura 35, la temperatura modifica el sobrepotencial requerido para la unidad electrolizadora, este sobrepotencial está relacionado directamente con la eficiencia del electrolizador (Chatenet, y otros, 2022). Otra manera de calcular el voltaje reversible de una celda electrolítica, considerando una presión atmosférica constante es con la Ecuación 13, que ofrece una opción empírica en función de la temperatura de la reacción.

$$U_{rev}(T_R) = 1.5184 - 1.5421 \cdot 10^{-3}T_R + 9.523 \cdot 10^{-5}T_R \ln(T_R) + 9.84 \cdot 10^{-8}T_R^2$$

**Ecuación 13** Polinomio empírico para el cálculo del voltaje reversible en función de la temperatura de reacción, tomado de (Gacia-Valverde, Espinosa, & Urbina, 2012)

Por lo tanto, es necesario tener una expresión que pueda relacionar la energía requerida con la temperatura a la cual se está dando la reacción electrolítica. Para eso se requiere redefinir las propiedades de la Tabla 16 en función de la temperatura de reacción ( $T_R$ ). Los cálculos correspondientes a las propiedades indicadas se encuentran en los



ANEXOS DEL CAPÍTULO 3, en la sección MEMORIA DE CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE REACCIÓN; así como a continuación.

### 3.1.2 MEMORIA DE CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE REACCIÓN

Considerando que las condiciones son diferentes del estándar (1 atm y 25°C) y que se hará el desarrollo para la reacción estándar de la electrólisis que se recupera de la Ecuación 9, se hace el cálculo de  $\Delta c_p$ ,  $\Delta S_R$ ,  $\Delta H_R$  y  $\Delta G_R$ .

De tablas (Rayner-Canham, 2000) se obtienen los valores de las capacidades caloríficas estándar a presión constante de los productos y reactivos de la reacción.

$$c_{p_{H_2O}}^0 = 75.29 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$c_{p_{H_2}}^0 = 28.82 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$c_{p_{O_2}}^0 = 29.35 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Entonces, se realiza el cálculo de las propiedades mencionadas.

$$\Delta c_p = \sum_{i=1}^{prod} (n_i c_{p_i}^0) - \sum_{i=1}^{reactivos} (n_j c_{p_j}^0)$$

$$\Delta c_p = \left[ 1 \cdot c_{p_{H_2}}^0 + \frac{1}{2} \cdot c_{p_{O_2}}^0 \right] - [1 \cdot c_{p_{H_2O}}^0]$$

$$\Delta c_p = -31.795 \frac{J}{K}$$

$$\Delta H_R = \Delta H_R^0 + \Delta c_p \cdot (T_R - T_R^0)$$

$$\Delta H_R = 285.83 \text{ kJ} - 31.795 \frac{J}{K} \cdot (T_R - 298.15K)$$

$$\Delta S_R = \Delta S_R^0 + \Delta c_p \cdot \ln\left(\frac{T_R}{T_R^0}\right)$$

$$\Delta S_R = 163.1795 \frac{J}{K} - 31.795 \frac{J}{K} \cdot \ln\left(\frac{T_R}{298.15K}\right)$$

$$\Delta G_R = \Delta H_R - T_R \cdot \Delta S_R$$

$$\Delta G_R = 298.83 \text{ kJ} - 31.795 \frac{J}{K} (T_R - 298.15K) - T_R 163.1795 \frac{J}{K} - 31.795 \frac{J}{K} \cdot \ln\left(\frac{T_R}{298.15K}\right)$$

Tabla 17 Propiedades de la reacción de electrólisis del agua en función de la temperatura de la reacción obtenido de la memoria de cálculo presentada

PROPIEDAD	FUNCIÓN
Energía Libre estándar de Gibbs $\Delta G$	$\Delta G_R = \Delta H_R - T_R \cdot \Delta S_R$
Entalpía estándar de la reacción $\Delta H_R$	$\Delta H_R = 285.83 \text{ kJ} - 31.795 \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot (T_R - 298.15\text{K})$
Entropía estándar de la reacción $\Delta S_R$	$\Delta S_R = 163.1795 \frac{\text{J}}{\text{K}} - 31.795 \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot \ln\left(\frac{T_R}{298.15\text{K}}\right)$

Con las funciones de la Tabla 17 se puede calcular los voltajes, reversible y termoneutral y con ello se puede saber el sobrepotencial y las eficiencias de la celda. Entonces, ya se puede continuar con el balance de masa, para estimar la cantidad de hidrógeno producido en la celda. El comportamiento esperado de las funciones calculadas en la Tabla 17 se muestra a continuación.

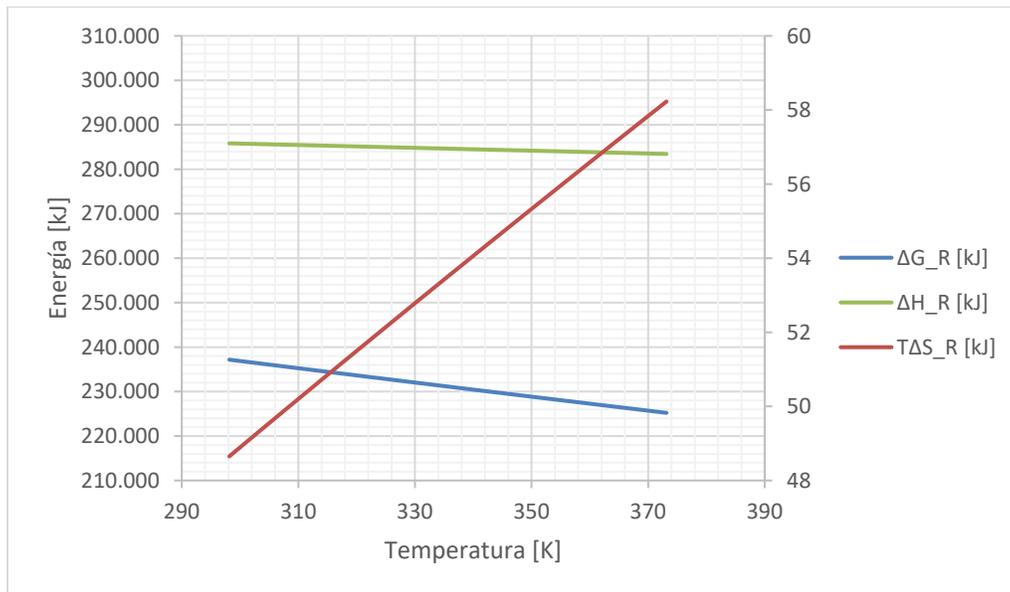


Figura 36 Comportamiento de las propiedades de la reacción electrolytica del agua a diferentes temperaturas

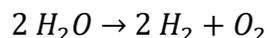
En la Figura 36 se observa que la energía requerida para llevar a cabo la reacción ( $\Delta H_R$ ) disminuye conforme la temperatura aumenta. Esto indica que la reacción llegará a ser espontánea en algún momento hipotético, cuando la temperatura sea la suficientemente alta. Este caso se dará cuando  $\Delta H_R$  se cruce con  $T \cdot \Delta S_R$ , considerando que la recta roja está referida al segundo eje de la gráfica (escala del lado derecho en la Figura 36).

Además del decremento de  $\Delta H_R$ , se puede observar se puede visualizar el aporte de  $\Delta G_R$  y  $T \cdot \Delta S_R$  para conformar la energía requerida. Dicho aporte es congruente con la función expuesta para la misma propiedad en la Tabla 17. En un uso práctico esto implicará que a medida que la temperatura de la reacción aumente, la electricidad requerida  $\Delta G_R$  será menor

y el calor aportado  $T \cdot \Delta S_R$  al sistema será mayor.

### 3.1.3 BALANCE DE MASA ESTEQUIOMÉTRICO

El balance de masa estequiométrico se puede calcular la cantidad de moles de agua procesados dentro de la celda a partir del balance de la reacción. Ya que la cantidad de agua procesada está dictada por la Ecuación 14, basta con identificar los coeficientes estequiométricos correspondientes al agua y al hidrógeno. Por lo tanto, la cantidad de agua que la celda electrolítica puede procesar es la misma cantidad de agua que ingresa, en moles.



#### **Ecuación 14 Reacción balanceada de la electrólisis del agua**

Por lo tanto, ya no es necesario realizar más cálculos. Gracias a la Ecuación 14 se ve claramente que el valor obtenido es la misma cantidad de moles de hidrógeno producido por la celda electrolítica. Sin embargo, esto es siempre en moles. Nunca se debe de confundir con masa, para conocer la masa se debe de multiplicar por la masa atómica del hidrógeno al número de moles. Esto implica que por cada 18 g de agua que ingrese a la celda, considerando un rendimiento de la reacción del 100%, se obtendrían 2 g de  $H_2$ .

### 3.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA PEM CON CURVAS DE POLARIZACIÓN

A continuación, se realizará el modelado matemático del comportamiento esperado de la celda electrolítica, por lo que se presentarán modelos previamente validados a través de pruebas experimentales en electrolizadores del tipo PEM, tomando en cuenta el efecto que tiene la temperatura de reacción ( $T_R$ ) y la densidad de corriente ( $i$ ) sobre el voltaje. Los resultados que se obtienen de estos modelos son lo suficientemente precisos para aplicaciones de ingeniería.

Por lo tanto, se requiere de un modelo, existente, de celda electrolítica PEM; sin embargo, habrá algunos fragmentos de información privilegiada a los cuales no se tiene acceso, por lo que en estos casos se realizará la aclaración y se utilizarán valores provenientes de la literatura disponible. Todo esto se realizará según la metodología mostrada en la Figura 37.



**Figura 37 Metodología para la creación de curvas de polarización a partir del cálculo de pérdidas de voltaje**

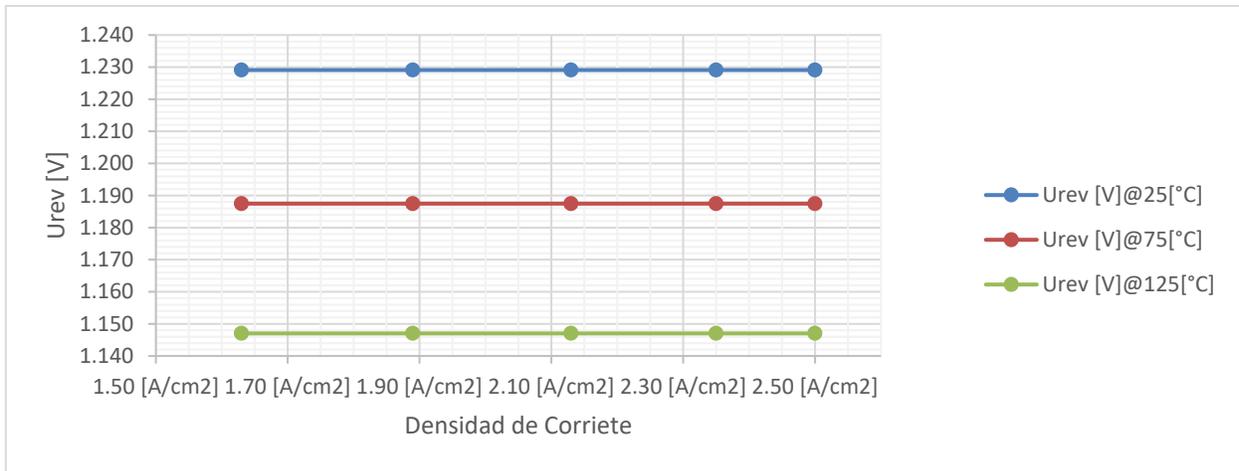
Con la metodología mostrada se realizan los cálculos de las pérdidas asociadas a la reacción. Estas pérdidas están ligadas a los materiales y las irreversibilidades inherentes a la reacción.

### 3.1.4.1 DEFINICIÓN DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN

La temperatura de la reacción se debe de definir de acuerdo a la temperatura deseada para el agua desionizada para electrólisis en el proceso de precalentamiento. Este proceso toma lugar en un intercambiador de calor colocado aguas arriba del electrolizador, mostrado en la Figura 48. La función del incremento de temperatura será suplantar y tomar una cierta cantidad de energía eléctrica y remplazarla con energía térmica. Es por esto que un gran número de las expresiones que siguen muestran una dependencia de la temperatura de reacción.

### 3.1.4.2 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y EL VOLTAJE REVERSIBLE DE LA REACCIÓN

Para calcular las propiedades termodinámicas se pueden utilizar las expresiones presentadas en la Tabla 17, que muestran una dependencia de  $T_R$  y en consecuencia harán que  $U_{rev}$  tendrá la misma dependencia, en caso de optar por utilizar la Ecuación 11 con los datos apropiados para temperatura correspondiente. Por otro lado, se podría hacer uso del modelo empírico propuesto por (Gacía-Valverde, Espinosa, & Urbina, 2012) en la Ecuación 13. En ambas instancias  $U_{rev}$  será dependiente de la temperatura de la reacción y los resultados son similares, al menos hasta la cuarta cifra decimal.



**Figura 38** Curva de polarización calculado del voltaje reversible a diferentes temperaturas

Sin embargo, como se había mencionado antes,  $U_{rev}$  no es la cantidad total de potencial que debe de ser aplicada para producir la reacción. Aunque es un buen punto de inicio, se debe de hacer el cálculo para conocer el voltaje total del electrolizador ( $U_{Total}$ ) (Falcao & Pinto, 2020). Este  $U_{Total}$  es un valor más acertado para producir una reacción y alimentar completamente al equipo, se muestra el modelo utilizado para el cálculo correspondiente.

$$U_{Total} = N_c \cdot (U_{rev} + U_{act} + U_{dif} + U_{\Omega})$$

**Ecuación 15** Cálculo del voltaje total del electrolizador

El voltaje total electrolítica es una función de la cantidad de celdas conectadas en serie  $N_c$ , el voltaje reversible ( $U_{rev}$ ), la temperatura de la reacción  $T_R$ , el voltaje de activación ( $U_{act}$ ), de difusión ( $U_{dif}$ ) y óhmico<sup>3</sup> ( $U_{\Omega}$ ). Se debe de hacer notar que esta ecuación está enfocada para una sola celda. Pero es necesaria para conocer el comportamiento de la unidad básica del electrolizador.

**3.1.4.3 DENSIDAD DE CORRIENTE**

Una vez que se ha calculado  $U_{rev}$  y conociendo la definición  $U_{Total}$ , se debe de definir la densidad de corriente que se utilizará en el equipo ( $i$ ). Esta densidad de corriente será dada por los fabricantes de los equipos. Por lo tanto, esta es una de esas instancias en las que se trata con información privilegiada. Por el momento, se mantendrá como una variable entre el rango de 0.1 y la densidad de corriente máxima ( $i_{Lim}$ ).

---

<sup>3</sup> El voltaje óhmico se refiere a las pérdidas por resistencia interna de los componentes de las celdas electrolíticas.

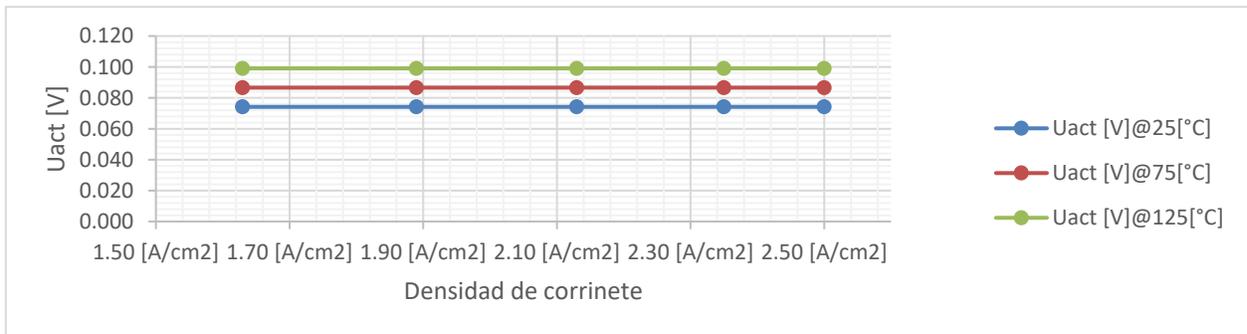
### 3.1.4.4 PÉRDIDAS DE VOLTAJE POR ACTIVACIÓN

Las pérdidas por activación son aquellas que se dan por la necesidad de sacrificar cierto voltaje para que las reacciones electroquímicas se realicen. La Ecuación 16 muestra el modelo utilizado para el cálculo de  $U_{act}$  (F. Marangio, 2009).

$$U_{act} = \frac{RT_R}{\alpha_a F} \operatorname{arcsinh} \left( \frac{i}{2i_{0,a}} \right) + \frac{RT_R}{\alpha_c F} \operatorname{arcsinh} \left( \frac{i}{2i_{0,c}} \right)$$

**Ecuación 16** Definición del voltaje de activación adaptada de (F. Marangio, 2009)

De acuerdo con la Ecuación 16, que está fundamentada en la “Ecuación de Butler-Vomler”, relaciona  $U_{act}$  al comportamiento de la densidad de corriente ( $i$ ); la densidad de corriente de intercambio en el ánodo y cátodo ( $i_{0,c}$  y  $i_{0,a}$ )<sup>4</sup>, respectivamente serán considerada iguales a  $i$ .; los coeficientes de transferencia de carga ( $\alpha_c$  y  $\alpha_a$ ) se consideran como 0.25 y 0.5 respectivamente pero hay más valores disponibles (Falcao & Pinto, 2020); la constante de gas ideal (R), con valor de  $8.314 \frac{J}{mol K}$ ; la temperatura de reacción ( $T_R$ ), a la cual se lleva a cabo la reacción; y la constante de Faraday, con valor de  $96485.33 \frac{C}{mol}$ .



**Figura 39** Curva de polarización del voltaje de activación calculado a diferentes temperaturas

El voltaje de activación, con la información planteada para los modelos tiene el siguiente comportamiento, el cual indica el incremento de  $U_{act}$  de acuerdo con  $T_R$  y  $i$ . Entonces, se pueden describir a las pérdidas por activación como una función con gran dependencia de  $i_{0,a}$  y  $i_{0,c}$ , ya que el resto de las variables involucradas en la Ecuación 16 actuarán en la medida que el cociente de la función trigonométrica lo indique. Por lo tanto, como se mencionó antes, es de suma importancia que estos parámetros los indique el fabricante con el mayor detalle posible, en este caso se han usado valores indicados en la literatura señalada.

<sup>4</sup> Para consultar más valores utilizados se pueden consultar los trabajos referidos.

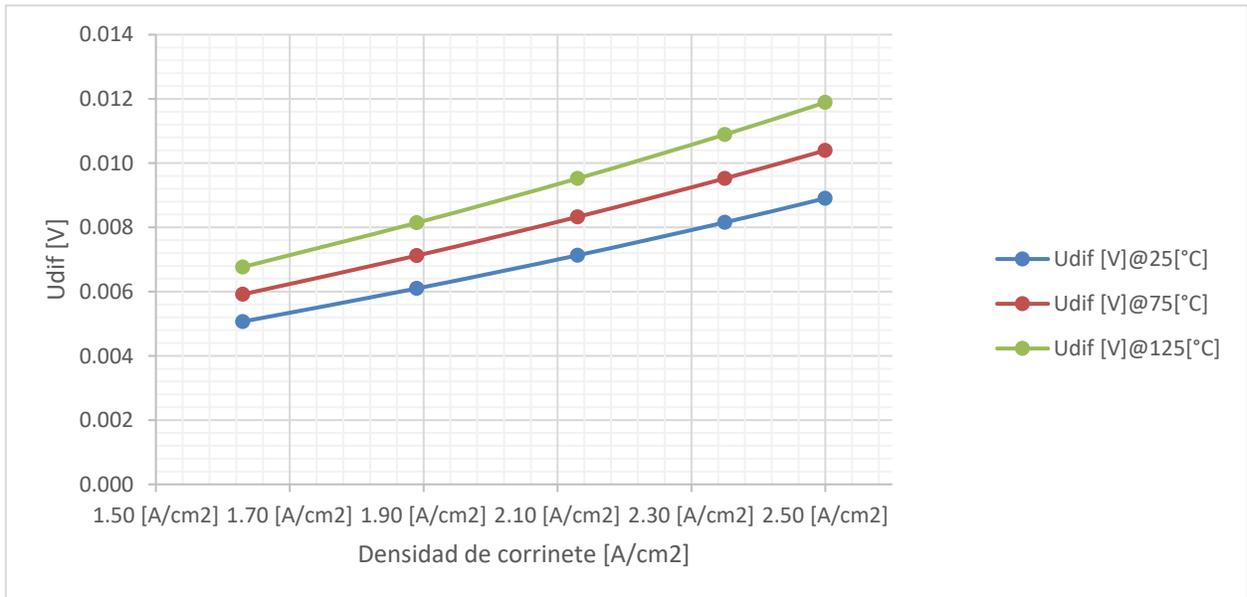
### 3.1.4.5 PÉRDIDAS DE VOLTAJE POR DIFUSIÓN

Las pérdidas por difusión, también conocidas como pérdidas de transporte, ocurren cuando la corriente es lo suficientemente alta como para impedir el acceso de reactivos a sitios activos por la sobrepoblación de moléculas reactivas (en este caso agua) por lo que se reduciría la velocidad de producción. El voltaje asociado a tal pérdida se puede definir con la En los electrolizadores PEM este comportamiento se puede observar hasta que se consiguen densidades de corriente de  $1.5 \frac{A}{cm^2}$  (Eng. Waseem Saeed, 2015) o  $1.6 \frac{A}{cm^2}$  (Falcao & Pinto, 2020).

$$U_{dif} = -\frac{RT_R}{nF} \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{Lim}}\right)$$

**Ecuación 17** Definición del voltaje por pérdidas de difusión

Por lo tanto, las pérdidas de potencial asociadas a fenómenos de transporte se definen en términos de  $R$ ,  $T_R$ ,  $n$ ,  $F$  y al rango que se otorga para la densidad de corriente límite ( $i_{Lim}$ ) es de 1.6 a  $2.5 \frac{A}{cm^2}$ , de acuerdo con la información de la Tabla 13 para las celdas PEM; sin embargo, en la práctica,  $i_{Lim}$ , será definido por el fabricante de los equipos y varía dependiendo del electrolizador.



**Figura 40** Curva de polarización del voltaje de difusión calculado a diferentes temperaturas

De acuerdo con lo que se comentó previamente, el comportamiento de las pérdidas asociadas a fenómenos de transporte y difusión es notable conforme  $i$  se acerca al valor de  $i_{Lim}$ ; además de ser afectadas por  $T_R$ , pero en un grado menor. Este comportamiento se puede observar en la Figura 40, en la que se muestran las pérdidas asociadas a tales fenómenos y el incremento es notorio conforme  $i$  se aproxima a  $2.5 \frac{A}{cm^2}$ .

### 3.1.4.6 PÉRDIDAS DE VOLTAJE POR RESISTENCIA INTERNA

la resistencia de la celda puede ser reformulada como una función del espesor del material de las placas ( $\delta$ ) y la conductividad del material ( $\sigma$ ) o en su defecto de la resistividad ( $\rho$ ) como se puede ver en la Ecuación 18 adaptada de (Falcao & Pinto, 2020).

$$R = \frac{\delta}{\sigma} = \rho \delta$$

#### Ecuación 18 Definición de la resistencia en función del espesor y conductividad de una placa

Definir la resistencia de una placa no equivale a la resistencia de una celda completa, habría que hacer el cálculo para cada una de los componentes de las celdas. Para efectos prácticos en el cálculo de la resistencia equivalente de una celda ( $R_{eq}$ ) se toma en cuenta las terminales eléctricas (ánodo y cátodo), y la membrana PEM. Por lo que se debe de tomar en cuenta que podrían ser de acero inoxidable hasta aleaciones de platino. Se elige el acero inoxidable para este trabajo, tomando en cuenta que si se espera utilizarlo en una aplicación práctica la resistencia del acero inoxidable ante un medio tan ácido como el interior de una celda PEM llevará a problemas de corrosión, en comparación con materiales especializados, y la vida útil de las placas disminuirá considerablemente. Por lo que sólo se considera en el ejercicio, ya en una aplicación ingenieril se recomienda explorar otros materiales. Por lo tanto, las placas de acero inoxidable tienen un espesor aproximado de 0.01 a 0.025 cm, con una conductividad de  $1.33 \times 10^4 \frac{1}{\Omega \cdot cm}$  (LEONI, s.f.).

Por otro lado, la membrana PEM tiene un espesor<sup>5</sup> de 75  $\mu m$  con una resistencia máxima de 205  $\frac{m\Omega}{cm^2}$ , y un área efectiva<sup>6</sup> ( $A_{efectiva}$ ) de  $9cm^2$  se considera la membrana “Aemion+” de la empresa “IONOMR”; su hoja de datos técnicos puede encontrarse en los ANEXOS DEL CAPÍTULO 3 en el apartado HOJA DE DATOS TÉCNICOS DE LA MEMBRANA PEM. La resistencia equivalente se podrá calcular usando el cálculo de resistencia equivalente para arreglos en serie, Ecuación 19, por la disposición que tienen los elementos dentro de la celda. Se considera el número de placas dentro de una celda ( $n$ ) y el número de membranas ( $n-1$ ).

La resistencia equivalente de cada celda propuesta es de 20.5  $\Omega$ , lo que se puede utilizar para conocer las pérdidas asociadas utilizando la densidad de corriente de operación y el área efectiva de la reacción.

---

<sup>5</sup> Se considera negligible la información del espesor y se usará la resistencia por área provista por IONOMR.

<sup>6</sup> De acuerdo con especialistas del INEEL se define el área efectiva de la membrana PEM como  $9cm^2$ , aproximadamente. Esta misma área efectiva se considerará para las placas.

$$R_{eq} = n \cdot \frac{\delta_{placa}}{\sigma_{placa} \cdot A_{efectiva}} + (n - 1) \cdot R_{memb} \cdot A_{efectiva}$$

**Ecuación 19 Resistencia equivalente de una celda, de acuerdo con los elementos internos de una celda PEM**

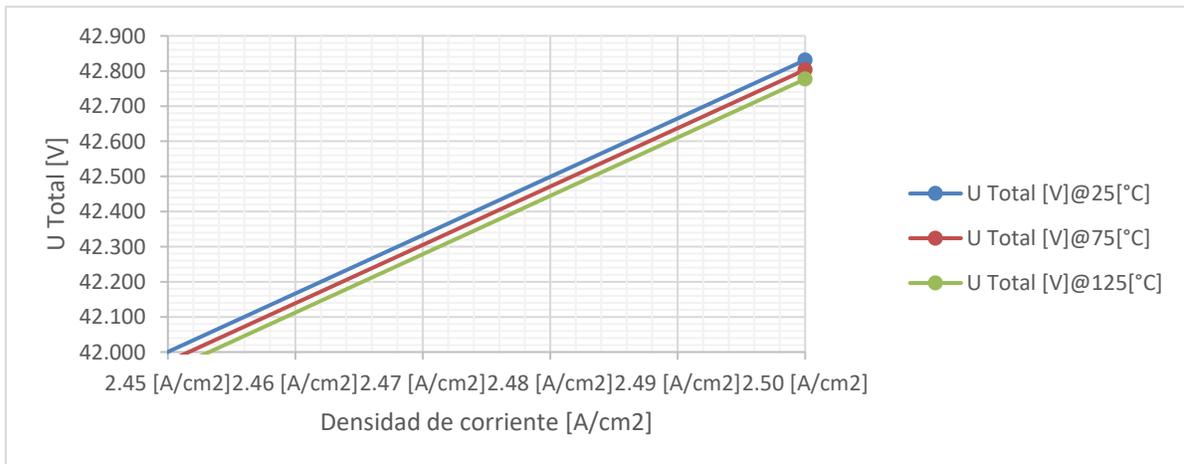
Como se puede notar, en este modelo, no se consideran los efectos térmicos para el cálculo de la resistencia equivalente de una celda. Es por esto que la el comportamiento estará en función de la densidad de corriente, además de los parámetros ya discutidos. El comportamiento que se puede esperar de este tipo de pérdidas es lineal, ya que el voltaje que corresponde a este tipo de pérdidas será calculado por la Ley de Ohm como se muestra a continuación en la

$$V_{\Omega} = \frac{R_{eq} \cdot i}{A_{efectiva}}$$

**Ecuación 20 Ley de Ohm adaptada para el cálculo del voltaje óhmico**

**3.1.4.7 MODELOS PARA EL CÁLCULO DE VOLTAJE TOTAL**

El voltaje total requerido para el funcionamiento del electrolizador se mostró anteriormente con la Ecuación 15. De acuerdo con tal expresión, ya se cubrieron los sumandos correspondientes de las pérdidas involucradas. Entonces, en la Figura 41 se muestra el comportamiento del voltaje total una vez que se han realizado los procedimientos anteriores, con las limitantes y consideraciones establecidas.



**Figura 41 Curva de polarización del voltaje total en relación a la densidad de corriente y la temperatura de reacción<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> La escala de la Figura 41 ha sido alterada para que se pueda apreciar el comportamiento que se desea mostrar.

El voltaje total requerido para el electrolizador aumentará con la tendencia mostrada en la Figura 41, en la que  $U_{act}@25^{\circ}C$  difiere de  $U_{act}@125^{\circ}C$  por aproximadamente 0.1 V, aproximadamente. Esto indica que la temperatura si afecta, de manera que a mayor temperatura de reacción se requiere de un menor voltaje total para la unidad electrolizadora. A pesar de que no es una reducción significativa de voltaje, el hecho de que esté presente implica que puede existir una mejora; ya que el modelo utilizado tiene múltiples áreas de oportunidad y se podría apoyar con pruebas experimentales en trabajos futuros.

### 3.1.4.8 MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS GASES PRODUCIDOS Y AGUA REQUERIDA

La cantidad de  $H_2$  producido se puede calcular de acuerdo con el modelo mostrado en la Ecuación 21, el cual está escrito de acuerdo con la Ley de Faraday (Gacía-Valverde, Espinosa, & Urbina , 2012).

$$H_2 = \frac{N_c \cdot I}{2F} \eta_F$$

#### Ecuación 21 Modelo de producción de hidrógeno

De acuerdo con el modelo propuesto para calcular el flujo molar de hidrógeno generado, se necesita conocer la cantidad de celdas conectadas en serie ( $N_c$ ); la eficiencia faradica ( $\eta_F$ ), que define la relación existente entre el flujo real y teórico de hidrógeno y se considera superior a 99% para el caso de los electrolizadores PEM (Gacía-Valverde, Espinosa, & Urbina , 2012); la constante de Faraday ( $F$ ), discutida anteriormente; y la corriente eléctrica a través de las celdas conectadas en serie<sup>8</sup>, deducida a partir del uso de la Ley de Ohm. Para conocer  $I$ , basta con dividir al voltaje total del equipo  $U_{Total}$  por la resistencia equivalente de las celdas  $R_{eq}$ . Ya que todas las celdas conectadas están en serie y tienen las mismas características, basta con multiplicarlas por el número de celdas presentes. En este caso, para este capítulo, sólo se consideró a una sola celda con 2 placas y 1 membrana.

Por otro lado, el cálculo del oxígeno requerido podría ser obtenido con el modelo propuesto por (Gacía-Valverde, Espinosa, & Urbina , 2012) o, se acuerdo con la sección 3.1.3 BALANCE DE MASA ESTEQUIOMÉTRICO, la cantidad de  $O_2$  producida es la mitad de  $H_2$  producido.

Finalmente, la cantidad de agua desionizada requerida para la alimentación del electrolizador, la cual puede ser calculada con el modelo complementario a la Ecuación 21 mostrado en la Ecuación 22 (Gacía-Valverde, Espinosa, & Urbina , 2012). También se podría hacer este cálculo a partir de la masa de los reactivos y hacer la suma, ya que por el principio de conservación de la materia la masa se conserva.

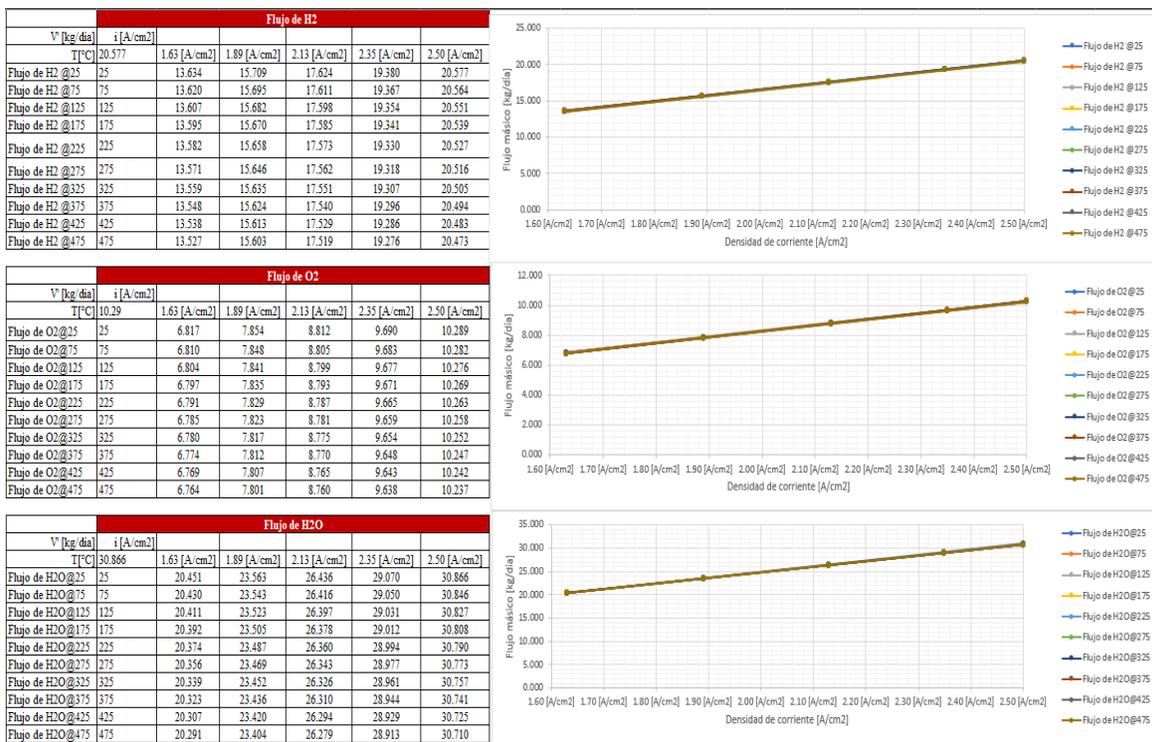
---

<sup>8</sup> Una conexión en serie permite que la corriente sea constante a través de todos los elementos del circuito, pero el voltaje variará de elemento a elemento.

$$H_2O = 1.25 \frac{N_c \cdot I}{2F} \eta_F$$

**Ecuación 22 Modelo para el cálculo del flujo de agua de alimentación**

A continuación, con los modelos presentados y modificándolos apropiadamente para modificar las unidades de los resultados de los gases producidos y el requerimiento de agua desionizada necesaria. Cabe mencionar que estos resultados son dependientes de la temperatura de reacción ( $T_R$ ), de acuerdo con lo establecido en la sección 3.1.4.1 DEFINICIÓN DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN; y con la densidad de corriente del electrolizador ( $i$ ). Al computar los modelos mostrados anteriormente, se consiguen comportamientos como los que se muestran en la Figura 42, en la cual se muestran junto a sus tabulaciones correspondientes a la Figura 59, Figura 60 y la Figura 61. Las figuras referidas se encuentran, a una escala mayor en la sección de ANEXOS DEL CAPÍTULO 3, dentro del apartado GRÁFICAS DE FLUJOS MÁSICOS PARA REACTIVOS/PRODUCTOS. Aquí se presentan de esta manera para que se puedan comparar, ya que los resultados están íntimamente relacionados.



**Figura 42 Comportamiento de los flujos másicos de los reactivos/productos**

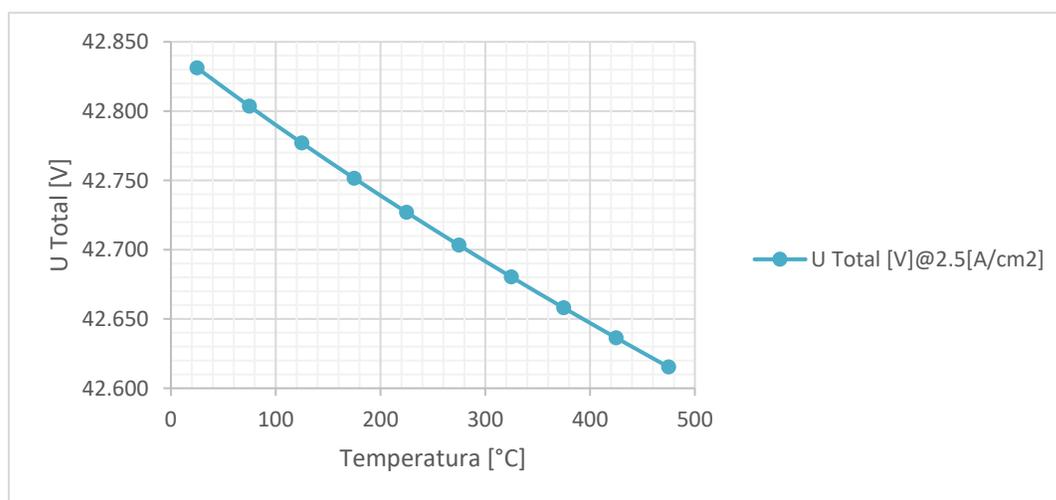
De acuerdo con el comportamiento demostrado en la figura anterior, se puede afirmar que la temperatura si tiene un efecto, que en un principio podría parecer adverso para la producción de  $H_2$  por medio de electrólisis PEM. Se colocaron las tabulaciones de cada una de las gráficas correspondientes para que se pudiera seguir el comportamiento de las diferentes curvas, ya que se encuentran muy cercanas entre ellas. Así mismo, en la sección de ANEXOS DEL CAPÍTULO 3, dentro de la sección GRÁFICAS DE FLUJOS MÁSICOS

PARA REACTIVOS/PRODUCTOS se incluyen individualmente las gráficas de la Figura 42

### 3.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

El contenido del capítulo permitirá al lector crear un modelo, fundamentado en las pérdidas energéticas asociadas a la reacción de electrolisis del agua para la producción de  $H_2$ . Esto es tomando en cuenta el efecto de la temperatura de la reacción y la intensidad de corriente que puede ser suministrada al equipo. Aunque los resultados no son del todo los esperados, la producción de  $H_2$  si es afectada en cierta medida por los efectos de la temperatura de reacción.

También, se debe de hacer notar que los resultados obtenidos corresponden a la consideración de una sola celda, de 2 placas y 1 membrana con las especificaciones mencionadas en el apartado PÉRDIDAS DE VOLTAJE POR RESISTENCIA INTERNA. Pero de acuerdo a lo mencionado en el apartado 3.1.4.8 MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS GASES PRODUCIDOS Y AGUA REQUERIDA, el efecto que tiene el número de celdas es benéfico para la producción de  $H_2$ , reduciendo la cantidad de energía eléctrica requerida en el proceso, Figura 43

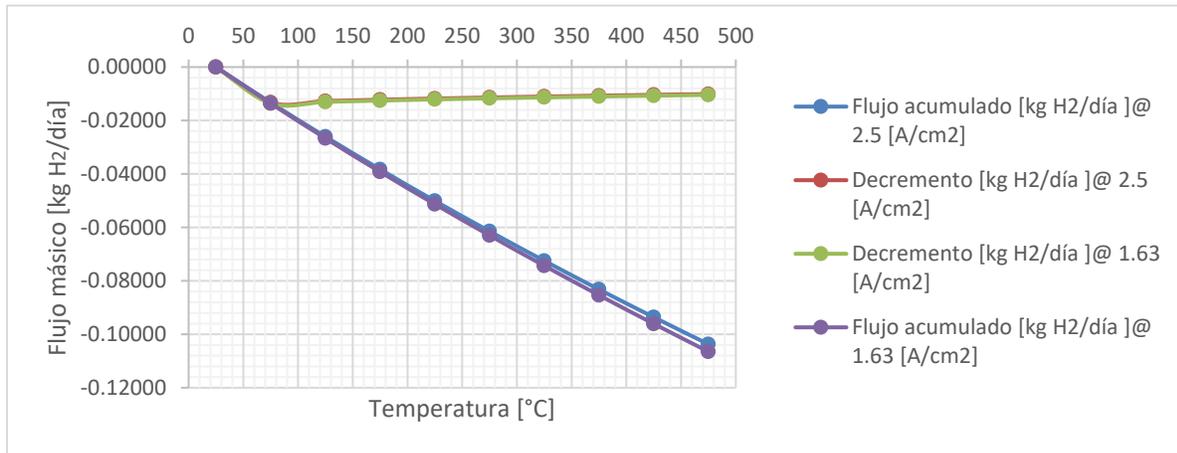


**Figura 43 Reducción del voltaje total requerido en el electrolizador en función de la temperatura de reacción**

Esto será de gran importancia en el siguiente capítulo, porque, al aumentar la cantidad de celdas conectadas, se puede saber los requerimientos energéticos para la alimentación del electrolizador. Ya que la fuente de alimentación tendrá su límite, pero con estos modelos se puede saber el voltaje total requerido  $U_{Total}$ , con la intensidad de corriente  $I$  utilizada. Sólo sería cuestión de caracterizar la fuente de alimentación y definir los límites de su operación. También debe de analizarse con mayor profundidad la optimización de los parámetros, esto se podría realizar con información real, en futuros trabajos, proveniente de un equipo previamente caracterizado.

Finalmente, la producción estimada para una celda, está contenida dentro del rango

de  $1.63$  a  $2.5 \frac{A}{cm^2}$ ; mientras que la temperatura está en un rango de  $25$  a  $300$  °C. La razón de tener un rango tan grande para la temperatura es meramente demostrativa del comportamiento.



**Figura 44 Comportamiento esperado del incremento de flujo respecto al aumento de la temperatura**

De acuerdo con la gráfica expuesta anteriormente en la Figura 44, que toma en cuenta sólo la condición mínima y máxima de densidad de corriente ( $1.6$  y  $2.5 \frac{A}{cm^2}$ ), se puede ver que el decremento de flujo másico (en azul y gris) tiene un comportamiento casi lineal. Esto indica que la tendencia de crecimiento es constante, lo que se puede probar cierto gracias al comportamiento de la curva correspondiente al “Decremento” (en rojo y verde); estas curvas comienzan cayendo notablemente en primera instancia, sólo para estabilizarse en un valor de aproximadamente  $-0.027 \left[ \frac{kg H_2}{día} \right]$  con  $1.63 \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$  y de  $0.10-0.018 \left[ \frac{kg H_2}{día} \right]$  con  $2.5 \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$ .

Entonces, el incremento de la temperatura sí es de ayuda para la cantidad de  $H_2$  producido en un día, al reducir la energía requerida. Sin embargo, la cantidad de  $H_2$  tiene un comportamiento casi lineal con una pequeña pendiente. Pero en el rango en el que se demuestra un incremento mayor es con  $\Delta T = 50^\circ C$ , en esta instancia es donde se encuentra el máximo observable de la curva correspondiente de la Figura 44 (en rojo), es en esta diferencia de temperaturas que se sugiere continuar en futuros análisis.

Por otro lado, la pendiente con la que las curvas de flujo acumulado están en función de la densidad de corriente con la cual el sistema esté operando. Por lo que, conforme la densidad de corriente aumente, el flujo acumulado de hidrógeno disminuirá con mayor rapidez. Con esta observación es seguro afirmar que los decrementos en la producción de  $H_2$  se aumentarán proporcionalmente<sup>9</sup> a la densidad de corriente con la que esté operando el sistema.

<sup>9</sup> Haciendo notar que el comportamiento puede ser simplificado para ser lineal después de cierto punto de operación, según lo explicado.

## 4 INTEGRACIÓN DEL CBM IIDEA100 CON UN ELECTROLIZADOR PEM

La integración de las tecnologías de ciclo binario modular (CBM) con un electrolizador PEM está dentro de los objetivos principales de esta tesis. Por lo que en este capítulo se describirá la instalación del CBM IIDEA100, sus parámetros termodinámicos y eléctricos que son necesarios para caracterizar la energía introducida en el electrolizador; el desempeño que la instalación resultante podría tener, de acuerdo con los datos del capítulo anterior; y cómo se puede comparar económicamente el  $H_2$  verde producido con esta instalación contra otras alternativas ya existentes.

### 4.1 CICLO BINARIO MODULAR IIDEA100

Un ciclo binario, como se discutió en un capítulo anterior, es un ciclo de potencia que utiliza dos fluidos para poder lograr generar potencia eléctrica. En el caso particular del ciclo binario modular (CBM) IIDEA100, el cual por la selección de fluidos de trabajo es un ORC, la potencia que se puede obtener es de 100 kW eléctricos. A continuación, se mostrará la información relevante de la instalación del CBM IIDEA100.

#### 4.1.1 INGENIERÍA DEL CBM100

El diseño del ciclo binario modular IIDEA100 es simple y se enfocó en hacer una unidad compacta que sea económicamente atractiva para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía (Linares Tapia, 2022). El proceso representado en la Figura 45, tomada de (Linares Tapia, 2022), tiene una simbología particular, descrita en la Tabla 18 y corresponde a los fluidos involucrados en la operación del ciclo de potencia.

Tabla 18 Simbología utilizada en el diagrama de flujo de proceso en el CBM IIDEA100

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	DETALLES
RE	Recurso geotérmico	Salmuera/H <sub>2</sub> O
FT	Fluido de trabajo	R1233zd
AE	Agua de enfriamiento	H <sub>2</sub> O

En la Figura 45 se muestra el diagrama de flujo de proceso, que indica los puntos de operación correspondientes a los fluidos

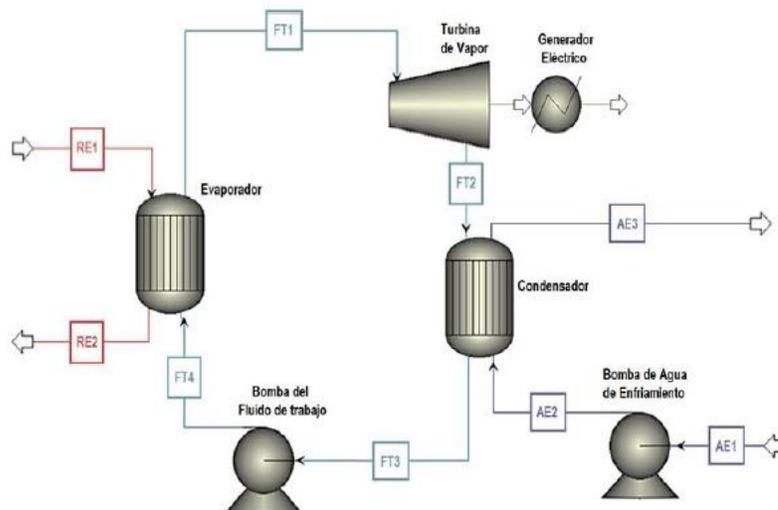


Figura 45 Diagrama de flujo del proceso del CBM IIDEA100

Los resultados obtenidos del balance de masa y energía, realizado por Linares (Linares Tapia, 2022), que partió del proceso mostrado en la Figura 45 ofrecen los siguientes puntos de operación respecto del CBM y se muestra en la Tabla 19, la cual muestra todos los equipos señalados en la Figura 45; así como la temperatura y presión de los fluidos de trabajo involucrados en su funcionamiento.

Tabla 19 Condiciones de operación de los distintos equipos del CBM IIDEA100

CONDICIONES DE ENTRADA		EQUIPO	CONDICIONES DE SALIDA		FLUIDO DE TRABAJO
$T_{sal}=170\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{sal}=8.5\text{ bar}$ $\dot{m}_{sal}=20500\text{ kg/hr}$	$T_R=48\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_R=20.5\text{ bar}$ $\dot{m}_R=18972\text{ kg/hr}$	<b>Evaporador IC-02-01</b>	$T_{sal}=119\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{sal}=8\text{ bar}$ $\dot{m}_{sal}=20500\text{ kg/hr}$	$T_R=143\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_R=20\text{ bar}$ $\dot{m}_R=18972\text{ kg/hr}$	<b>Salmuera / R1233zd</b>
$T_R=143\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_R=20\text{ bar}$ $\dot{m}_R=18972\text{ kg/hr}$		<b>Turbina TU-02-01</b>	$T_R=89\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_R=3.6\text{ bar}$ $\dot{m}_R=18972\text{ kg/hr}$		<b>R1233zd</b>
$T_R=89\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_R=3.6\text{ bar}$ $\dot{m}_R=18972\text{ kg/hr}$	$T_{H_2O}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{H_2O}=2\text{ bar}$ $\dot{m}_{H_2O}=75380\text{ kg/hr}$	<b>Condensador IC-02-02</b>	$T_R=47\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_R=3.1\text{ bar}$ $\dot{m}_R=18972\text{ kg/hr}$	$T_{H_2O}=38\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{H_2O}=1.5\text{ bar}$ $\dot{m}_{H_2O}=75380\text{ kg/hr}$	<b>R1233zd / H<sub>2</sub>O</b>
$T=47\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P=3.1\text{ bar}$ $\dot{m}=18972\text{ kg/hr}$		<b>Bomba refrigerante BA-02-01</b>	$T=48\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P=20.5\text{ bar}$ $\dot{m}=18972\text{ kg/h}$		<b>R1233zd</b>
$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P=1\text{ bar}$ $\dot{m}=75380\text{ kg/hr}$		<b>Bomba enfriamiento BA-05-01</b>	$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P=2\text{ bar}$ $\dot{m}=75380\text{ kg/hr}$		<b>H<sub>2</sub>O</b>

De la Tabla 19 se pueden calcular la eficiencia termodinámica y la eficiencia exergética. Respectivamente, son 8.78% y 33%. Por lo tanto, el CBM IIDEA100 tiene una eficiencia baja, lo que es normal al tratarse de un ciclo binario con rangos bajos de temperaturas. Mientras que la eficiencia exergética del ciclo indica que sólo el 33% de la energía disponible se convertirá en trabajo útil y aprovechable.

Mientras que los puntos de operación del CBM IIDEA100 ofrecen un vistazo a las condiciones en las que se podría aprovechar el recurso geotérmico, energía calorífica para la electrólisis de agua; además de identificar el desempeño original del ciclo (cuando sólo entrega energía eléctrica a la RNT). Dicho trabajo aprovechable se convertirá en electricidad en el generador eléctrico acoplado y esa electricidad sería utilizada como recurso vital para la producción de hidrógeno verde. Los parámetros eléctricos correspondientes a la salida, según el diseño de (Linares Tapia, 2022), del ciclo binario IIDEA100 se muestran en la Tabla 20.

**Tabla 20 Parámetros de la energía eléctrica generada por el CBM IIDEA100**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Voltaje</b>	731 $V_{DC}$
<b>Corriente</b>	150 A
<b>Potencia</b>	110 kW

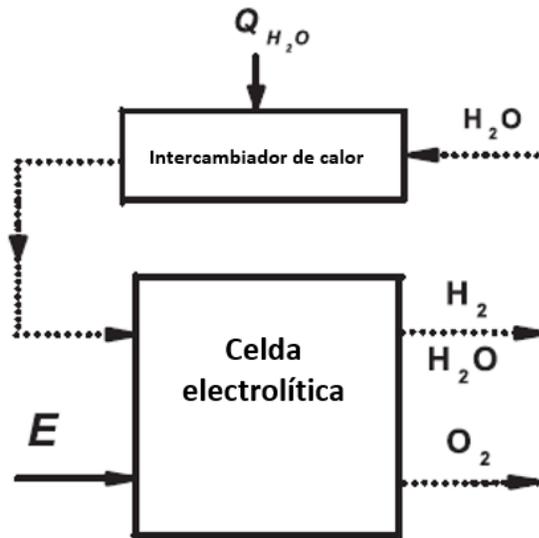
A pesar de eso, gracias a la presencia de un tablero eléctrico de acondicionamiento la salida puede ser variable. Esto significa que el voltaje trifásico de salida puede ser modificado en función de los requerimientos de los equipos o red/es que alimente el CBM IIDEA100. Después de este tablero de acondicionamiento, se tiene voltaje y corriente (ambas directas) que pueden ser introducidas al sistema de electrólisis.

## **4.2 ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA INSTALACIÓN CBM/ORC-PEM**

La estimación del desempeño de la instalación propuesta se requiere de un balance de masa y energía nuevo. Afortunadamente, se puede utilizar los datos previamente mostrados para el CBM IIDEA100 y la celda PEM. Sin embargo, antes se debe de mostrar cómo sería el arreglo de los equipos, de tal forma que su acoplamiento sea sencillo, sin modificar con mayores cambios al CBM IIDEA100.

### **4.2.1 PROPUESTA DE LA INSTALACIÓN CBM/ORC-PEM**

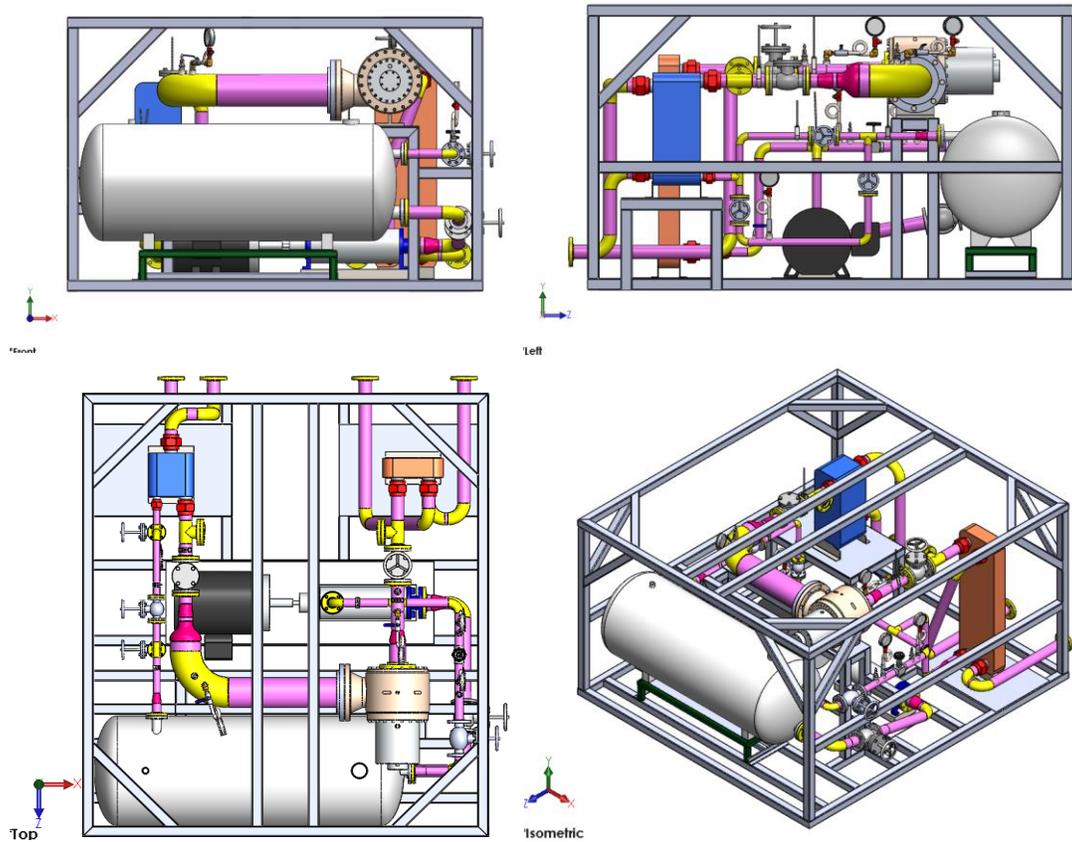
Ya que la instalación del CBM IIDEA100 no puede ser alterada en su gran mayoría, Figura 47, se deberá de hacer los arreglos necesarios en el acoplamiento del electrolizador, como se sugiere en la Figura 48. Por lo tanto, la instalación propuesta debe de acomodar los sistemas de tal forma que el equipo de electrólisis tenga una disposición similar, para la unidad electrolizadora, a la que se observa en la Figura 46, tomada de (Houcheng, Guoxing, & Jincan, 2010). En el esquema mostrado se puede ver el precalentamiento del agua para electrólisis en el “Intercambiador de calor 1”.



**Figura 46 Diagrama esquemático de un sistema típico de electrolisis de agua para la producción de hidrógeno con precalentamiento de agua, tomado de (Houcheng, Guoxing , & Jincan, 2010).**

Una vez que se ha añadido calor en el “Intercambiador de calor 1” y la temperatura del agua de proceso ha sido aumentada, se introduce el agua al conjunto de celdas electrolíticas, también conocido como “Stack”. Dentro del stack se produce la reacción electrolítica del agua y se separan las corrientes de hidrógeno y oxígeno, en el caso de una celda PEM se realiza la separación de corrientes gracias a la membrana polimérica.

Por otro lado, se tiene la instalación del CBM IDEA100, la cual tiene su construcción de la siguiente manera, Figura 47. En la figura mostrada se ve un modelo tridimensional de la instalación, que ofrece una guía espacial y dimensional de los equipos y su instalación dentro de su bastidor.



**Figura 47 Vistas de la instalación del CBM IIDEA100**

Con las vistas mostradas (Frontal, Superior, Izquierda e Isométrica) se tiene una mejor idea de las dimensiones y nivel de preparación tecnológica que posee el CBM IIDEA100. Entonces, tomando en cuenta la instalación del CBM IIDEA100 y la información de (Houcheng, Guoxing , & Jincan, 2010), se realizó el diagrama de flujo de proceso (DFP) del acoplamiento del electrolizador con el CBM IIDEA100, mostrado a continuación en la Figura 48. Se debe de aclarar que las dimensiones aproximadas del CBM IIDEA100 es de 3x3x2m, lo que lo hace compacto y ofrece una instalación fácil y flexible del equipo.



A pesar de la utilidad del trabajo de Linares, el CBM IIDEA100 tiene un rango de operación variable, dependiendo del comportamiento asignado a su variable de control (gasto de refrigerante). Por lo tanto, se puede tener una salida de potencia diferente a 100 kW al regular el gasto de R1233zd. Esto tiene un efecto directo no sólo en la potencia térmica que se puede generar con la turbina, por consiguiente, la potencia eléctrica en el generador. También se tiene un efecto en la temperatura del recurso geotérmico a la salida del evaporador, recordando que de acuerdo con el DFP presentado en la Figura 48 la salida del evaporador es la línea que está conectada a un intercambiador de calor (IC-03-001) donde se precalentará el agua desionizada para la electrólisis. Por lo tanto, se puede caracterizar a la operación de la instalación CBM/ORC-PEM bajo la siguiente regla cualitativa: conforme la demanda eléctrica del ciclo se incrementa, se tendrá un potencial térmico menor para precalentar el agua desionizada.

#### 4.2.2.1.1 RANGO DE OPERACIÓN DEL CBM IIDEA100

Al modificar el gasto másico del CBM IIDEA100 se puede afectar directamente la potencia térmica generada por la turbina y aquella que se puede utilizar para precalentar el agua desionizada para la electrólisis. En el siguiente análisis se modificará dicha potencia térmica producida por el ciclo binario en función de la variable de control ( $\dot{m}_R$ ), y se dará seguimiento al comportamiento de la temperatura de salida del evaporador (IC-02-001 de acuerdo con Figura 48). Los factores limitantes que existen son: el punto de operación de la bomba de refrigerante del CBM IIDEA100 y la temperatura del recurso geotérmico. Ya que sus parámetros de operación están dictados por el diagrama T-S presentado en la Figura 49, el cual tiene (en rojo) el comportamiento del recurso geotérmico, (en verde) las líneas de proceso que unen cada estado con el siguiente y (en azul) el comportamiento del agua de enfriamiento. Estas dos rectas son las limitantes para el rango de operación de la instalación CBM/ORC-PEM.

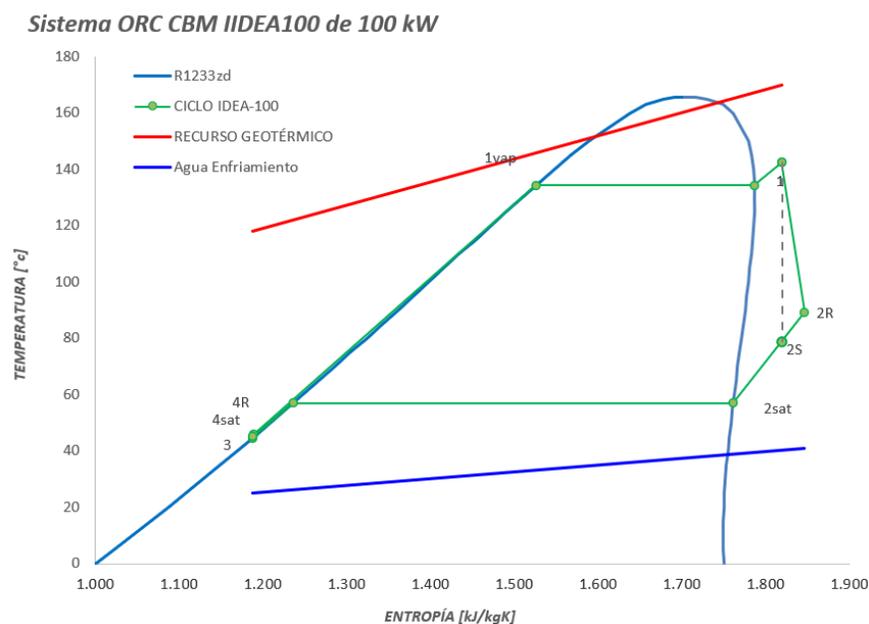
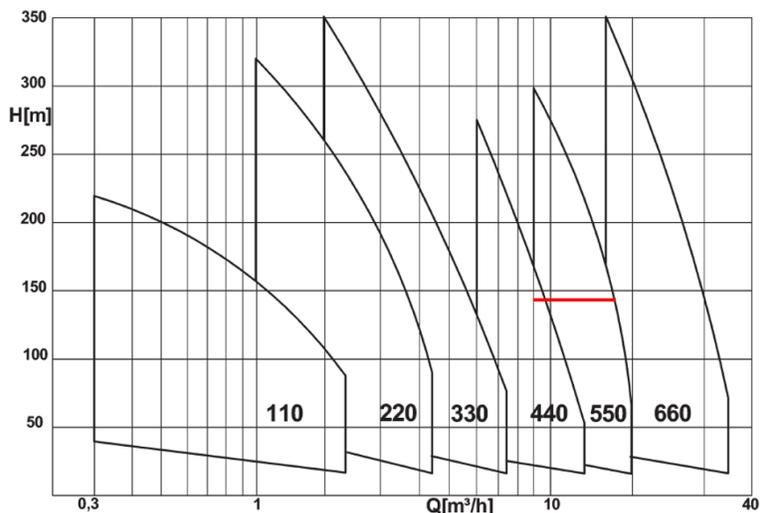


Figura 49 Diagrama T-S del sistema ORC CBM IIDEA100 tomado de (Alarcón Flores, 2020)

El rango en el que podría operar la bomba del CBM IIDEA100, su ficha técnica se puede consultar en los ANEXOS DEL CAPÍTULO 4, en el apartado FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE REFRIGERANTE DEL CBM IIDEA100, dentro se encuentra la versión original de su curva de operación, la cual dicta el comportamiento de la cabeza de la bomba en función del caudal, o viceversa. De acuerdo con la Figura 50, que muestra los diferentes conjuntos de puntos de operación para las diversas series que trabaja la empresa “SERO Pump Systems” (SERO Pump Systems, 2019).



**Figura 50** Curva de operación de las diferentes series de bombas SERO

De acuerdo con la imagen anterior, la serie 550 (serie a la que pertenece la bomba del CBM IIDEA100) de bombas puede operar con cualquiera de los puntos que se encuentren dentro del correspondiente. Entonces, manteniendo que las presiones deben de mantenerse como en la Tabla 19, donde la bomba de refrigerante tiene una cabeza de 17.4 bar o 142.3 m de cabeza de R1233zd, considerando que la densidad del R1233zd es de  $1246.7 \frac{kg}{m^3} @ 50^{\circ}C$ . Por lo tanto, el gasto con el rango del gasto con el que podría trabajar es desde  $9 \frac{m^3}{hr}$  hasta  $20.1 \frac{m^3}{hr}$  ( $11220 \frac{kg}{hr}$  a  $25057 \frac{kg}{hr}$ ), manteniendo una cabeza de 142 m, la línea roja en la Figura 50 muestra tal rango de operación, la potencia térmica que puede producir el CBM IIDEA100 que corresponde a tal rango de gasto másico sería de 77.3 kWt con 64.3 kW eléctricos hasta 171.7 kWt con 142.9 kW eléctricos. En la siguiente tabla se resumen los resultados del análisis.

**Tabla 22 Rango de operación propuesto para el CBM IIDEA100**

<b>GASTO</b> $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$	<b>GASTO MÁSICO</b> $\left[\frac{kg}{hr}\right]$	<b>POTENCIA ELÉCTRICA</b> <sup>10</sup> [kW]	<b>TEMPERATURA DE SALIDA SALMUERA</b> [°C]
9	11220	63.6	139
20.1	25057	142.9	101

En la Tabla 22 se muestra el rango propuesto para el CBM IIDEA100. Este rango toma en cuenta la operación de la bomba, de acuerdo a lo que se explicó con la Figura 50 respecto a su punto de operación; y la temperatura del recurso geotérmico, ya que no debe de cruzar ninguna línea de proceso (en verde) mostradas en la Figura 49 porque significarían una operación imposible de realizar.

Para la alimentación del sistema de electrolisis se utilizará ambos escenarios límites, de tal forma se podrá ver los límites que la producción de  $H_2$  tendría con el CBM IIDEA100 como fuente de energía.

#### 4.2.2.2 INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA PRECALENTAMIENTO DE AGUA DESIONIZADA

El precalentamiento es una etapa que favorece el comportamiento de la reacción, como se pudo ver cuantitativamente en el capítulo anterior. Por tal motivo, es necesario hacer un dimensionamiento básico del equipo (IC-03-.001 según la Figura 48). Para esto se hace uso de los dos escenarios propuestos en la Tabla 22. Se considera una eficiencia del 90%, como se mencionó, lo que implica que el rango de temperaturas a la cual se precalentará el agua desionizada para la reacción electrolítica será de 95.9°C hasta 132°C. Estas temperaturas corresponden al escenario de máximo flujo másico  $\left(25057 \frac{kg}{hr}\right)$  y mínimos flujo másico  $\left(11220 \frac{kg}{hr}\right)$ , respectivamente.

#### 4.2.3 COMPORTAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

Una vez que se ha completado el análisis del comportamiento del CBM IIDEA100, de acuerdo con sus parámetros restrictivos (flujo de la bomba a presión constante), se deben de recuperar conceptos y resultados presentados previamente y añadirlos al rango de operación calculado; así como la entrega de corriente y voltaje del CBM IIDEA 100, correspondiente a los valores del rango en la Tabla 22. Además, se debe de comentar algunas particularidades de la instalación eléctrica correspondiente al CBM IIDEA100, por razones

---

<sup>10</sup> Potencia producida en el generador eléctrico del CBM IIDEA100.

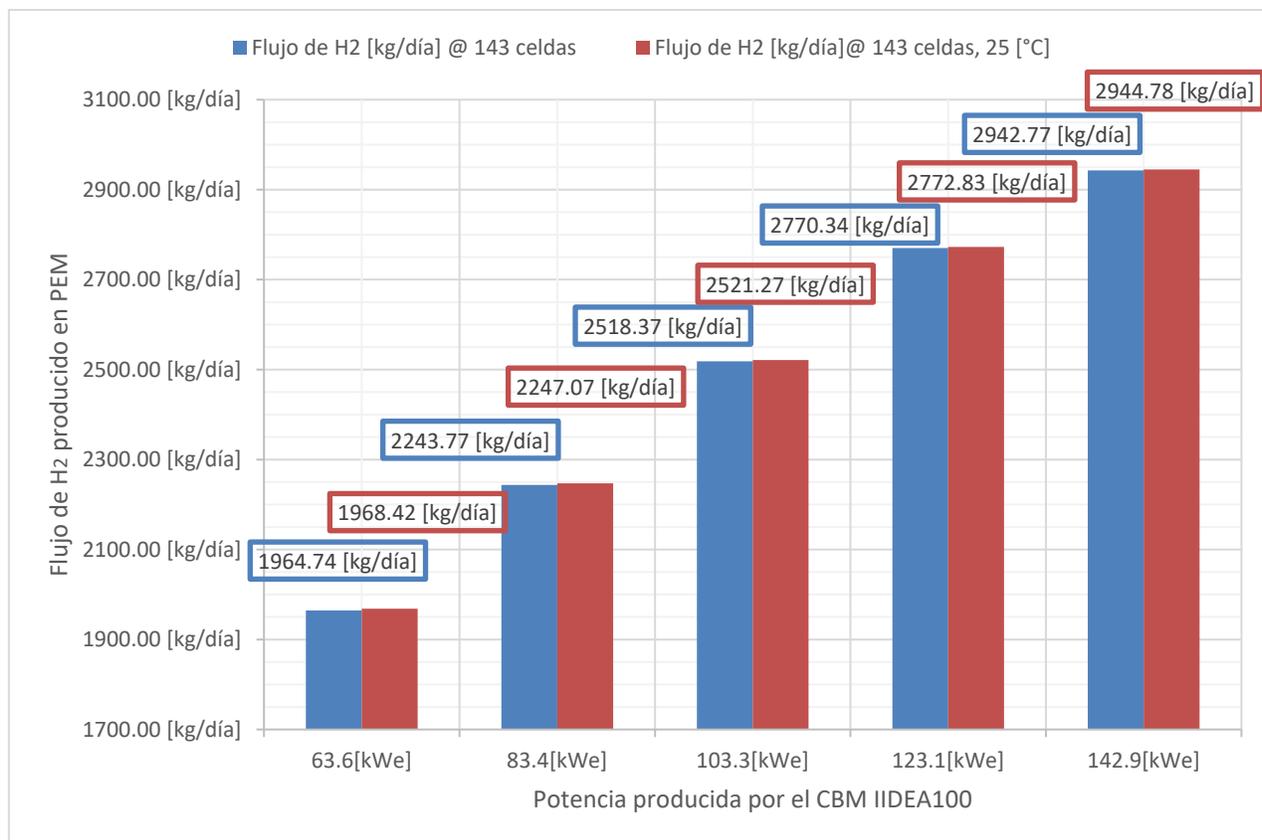
lógicas es necesario conocer la transformación de la electricidad por medio del panel de acondicionamiento eléctrico para el cambio de alterna a directa. Gracias a la presencia del panel de acondicionamiento eléctrico, el cual es la combinación de los equipos RC-03-001 y DC/DC-03-001 en la Figura 48. La salida de estos dispositivos eléctricos asegura una salida de voltaje regulable, gracias a la electrónica de potencia correspondiente, según los requerimientos del electrolizador.

Una vez que se ha aclarado la alimentación eléctrica, la cuál es variable, se pueden realizar los cálculos correspondientes para el desempeño de la instalación CBM/ORC-PEM. Para esto, se realizará el análisis bajo las siguientes suposiciones:

1. La instalación se analizará bajo un régimen de operación estable, cuando ya habría superado la etapa de arranque, para que se analice en el máximo rendimiento posible
2. La densidad de corriente máxima será definida por los límites de suministro por el CBM IIDEA100, corriente y voltaje; así como el área efectiva discutida anteriormente, mientras que el voltaje total requerido está definido en función de las pérdidas y la cantidad de celdas en serie.
3. Se considerará un intercambiador de calor genérico para la instalación, que tendrá una eficiencia del 95%. Se deja a trabajos futuros un dimensionamiento con mayor detalle.
4. Los límites para la densidad de corriente están definidos por la información contenida en la Tabla 13, de  $0.6 \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$  a  $2.5 \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$ . Pero de acuerdo con el punto 1 se considera operación estable la operación a máxima densidad de corriente,  $2.5 \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$ .
5. De acuerdo con los límites para  $i$  del punto anterior se definirá la cantidad máxima de celdas en función del límite superior, para calcular la producción máxima posible. Este número de celdas se mantendrá como constante en todas las iteraciones.

#### 4.2.4 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA CBM/ORC-PEM

Los resultados obtenidos, usando los modelos matemáticos expuestos en el capítulo anterior y tomando en cuenta las consideraciones recién expuestas rinden los siguientes resultados, contenidos en la Figura 51. En esta figura se tiene representada diferentes puntos de operación de la instalación CBM/ORC-PEM, limitados por las potencias eléctricas definidas en el apartado 4.2.2.1.1 RANGO DE OPERACIÓN DEL CBM IIDEA100.



**Figura 51 Desempeño de la instalación propuesta CBM/ORC-PEM**

Como se puede apreciar en la Figura 51 el comportamiento de la generación de  $H_2$  cuando se le añade un proceso de precalentamiento al agua para electrolisis (en azul), en comparación con la electrolisis a una temperatura estándar constante (en rojo). Se debe de hacer notar que la diferencia presente entre los valores correspondientes es mínima y casi negligible, siendo que en potencias bajas (cerca al límite inferior de la operación del CBM IIDEA100) se notan una diferencia de  $-3.67 \left[ \frac{kg H_2}{día} \right]$  en el valor más bajo 63.6 [kWe]; mientras que, conforme aumenta la potencia eléctrica al valor máximo del rango de operación (142.9[kWe]) la diferencia es de  $-2.01 \left[ \frac{kg H_2}{día} \right]$ . Este comportamiento indica que el distanciamiento entre las dos curvas se reduce conforme la potencia aumenta. Por lo tanto, en el caso particular de esta instalación, en la que se propone el uso en cascada de la salmuera proveniente de la salida del IC-02-001 del CBM IIDEA100, la ventaja del precalentamiento existe; sin embargo, por la relación existente entre potencia eléctrica y temperatura de salmuera el beneficio por encima de la electrolisis a temperatura ambiente disminuye como se muestra. Pero, de acuerdo a la información presentada, la cantidad de energía requerida para la reacción de  $H_2$  disminuye con el incremento de temperatura, como se vio en la Figura 43 del capítulo anterior; este comportamiento también es cierto para el análisis presente porque proviene del mismo modelo matemático.

#### 4.2.5 COSTOS DE H<sub>2</sub> VERDE PRODUCIDO POR DIFERENTES FUENTES

Como parte de su análisis del CBM IIDEA100, Linares (Linares Tapia, 2022) realizó un estudio de factibilidad económica del ciclo binario. De este análisis se extrae la información de la Tabla 23 para un ciclo de 100kW de generación eléctrica. Pero antes de iniciar, se debe de hacer la siguiente suposición, este análisis de costos toma en cuenta la instalación del equipo de electrolisis descrito con anterioridad, por lo que se consideran los mismos costos siempre y, independientemente del sistema energético al cual se acople. Entonces, sólo se toma en cuenta el costo nivelado de generación de cada alternativa. Además, quedan descartadas las consideraciones de los costos por instalación, mantenimiento y operación. Este análisis se limita sólo a la comparativa de costos de generación de hidrógeno.

**Tabla 23 Resultados del análisis económico del CBM IIDEA100**

<b>PARTIDA</b>		
<b>Capital invertido</b>	$\frac{USD}{kW}$	\$ 3,313.04
<b>Capital total invertido</b>	<i>MXN</i>	\$ 6,581,784
<b>Costo nivelado de generación (USD)</b>	$\frac{USD}{kWh}$	\$0.07
<b>Costo nivelado de generación (MXN)</b>	$\dot{W}_{BAE}$	\$ 3,313.04
<b>Tiempo de recuperación</b>	<i>años</i>	8
<b>TIR</b>	%	13.66

Los valores representados en la Tabla 23 resumen la situación económica del CBM IIDEA100. Es de particular importancia el costo nivelado de generación, ya que ese permitirá comparar el costo de 1 kWh producido con el ciclo binario modular contra otras alternativas para energías renovables. La comparativa que se presenta, para generación de hidrógeno verde son las posibilidades de utilizar energía fotovoltaica y eólica, ya que son las energías renovables que son más utilizadas para energizar la producción de hidrógeno verde.

Por un lado, la energía fotovoltaica tiene un costo entre €1.10/W y €2/W (BESUN ENERGY, 2019), lo que se traduciría a 1.18 USD/W y 2.14 USD/W<sup>11</sup>. Entonces, un proyecto con una capacidad de 100kW se requerirían entre \$118,000 USD y \$200,000 USD. Además, de acuerdo con (Linares Tapia, 2022) se requerirían entre 380 y 410 paneles fotovoltaicos, que ocuparían al menos 656 metros cuadrados para su instalación con un factor de planta de 16% (IMCO, 2022). Dicha instalación produciría un promedio de 455 kWh. Por lo tanto, el costo nivelado de un proyecto de este tamaño sería de, aproximadamente, \$0.09 USD/kWh.

<sup>11</sup> Costo del dólar estadounidense €0.93, consultado 24/04/2024

Mientras que un proyecto de energía eólica tiene un costo de, aproximadamente a la información que proporciona la IRENA de \$0.033 USD/kWh (IRENA, 2022). Por lo tanto, los costos nivelados de generación se pueden resumir en la Tabla 24, donde se comparan los costos de las alternativas planteadas.

**Tabla 24 Costos nivelados de generación para diferentes alternativas renovables y el costo de 24 horas de generación**

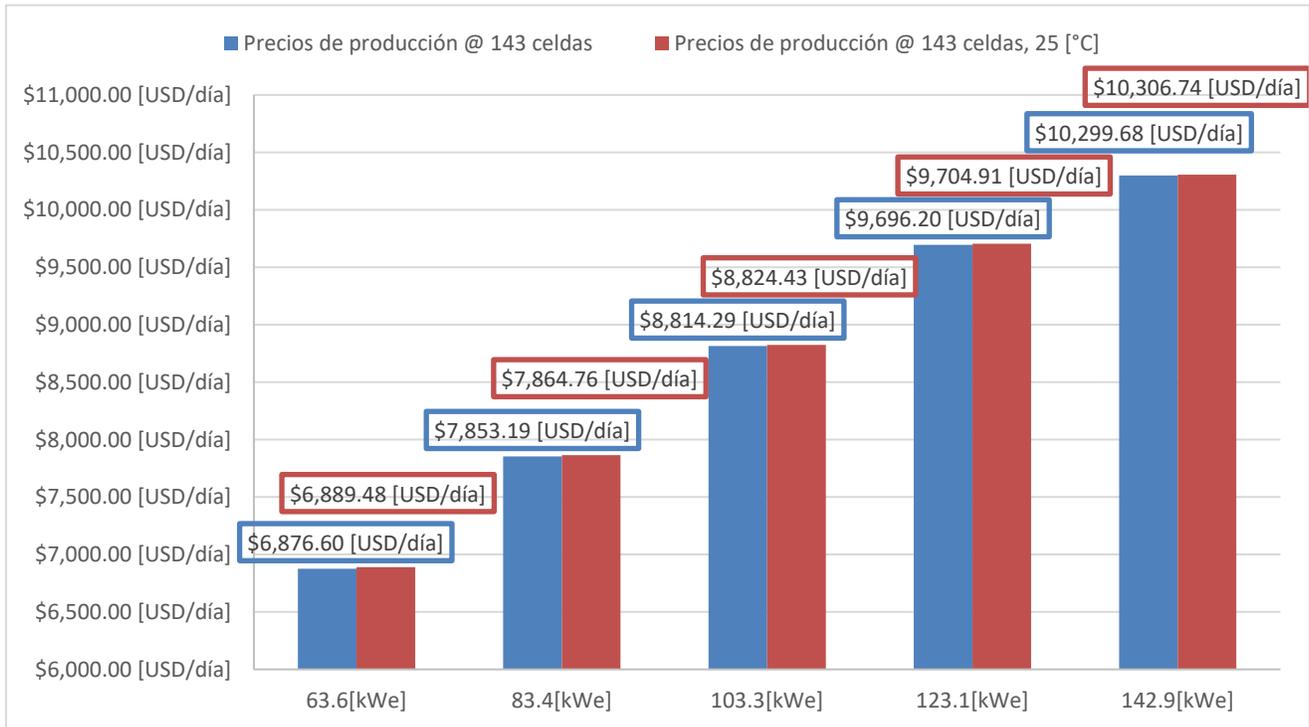
<b>COSTOS NIVELADOS DE GENERACIÓN</b>			
<b>EQUIPO</b>	<b>COSTO/kWh</b>	<b>GEN. DIARIA</b>	<b>COSTO DIARIO</b>
<b>CBM IIDEA100</b>	$\$0.07 \frac{USD}{kWh}$	1526.4 kWh	\$106.84 USD \$240.07 USD
<b>Solar</b>	$\$0.09 \frac{USD}{kWh}$		3429.6 kWh
<b>Eólica</b>	$\$0.033 \frac{USD}{kWh}$		

Por lo tanto, en la tabla anterior se muestran los costos nivelados de generación diarios para el CBM IIDEA100; así como para las alternativas (solar y eólica). De tal manera que se puede comparar el costo contra la venta del  $H_2$  producido<sup>12</sup>. Con el costo se puede conseguir la siguiente gráfica, que muestra los siguientes precios de la producción diaria.

---

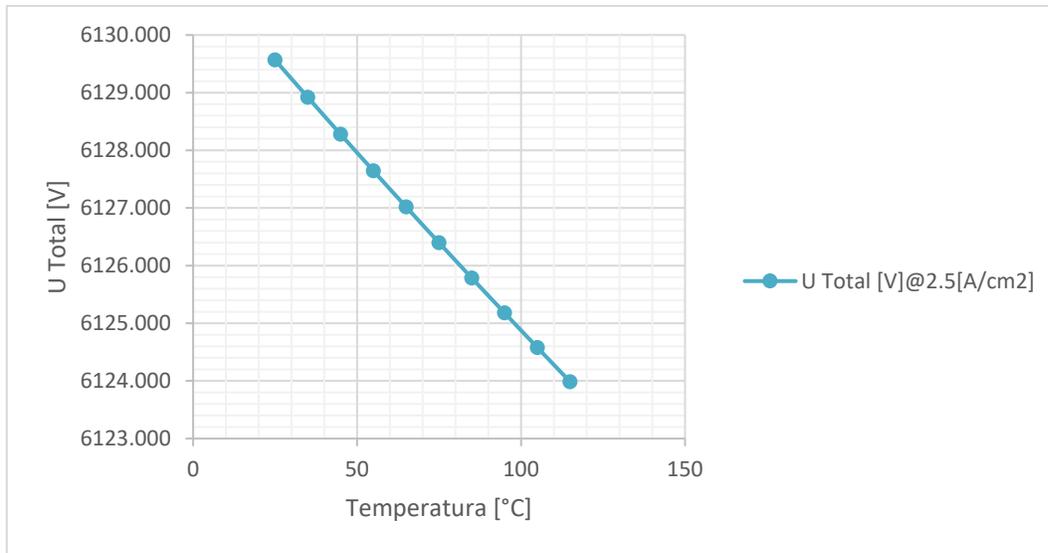
<sup>12</sup> El costo del  $H_2$  al momento, en México es de  $\$3.5 \left[ \frac{USD}{kg H_2} \right]$  (Alianza Energética México-Alemania, 2021)

**Tabla 25 Precios de la producción, en USD, diaria de H<sub>2</sub>**



Debe de notarse que los precios a los que se podría vender el  $H_2$  opaca a los costos nivelados de generación de la Tabla 24. Por lo que, en un futuro, se deberá de hacer un análisis económico propio para diseñar la opción económica viable; una vez se seleccionen equipos concretos para el proceso de electrólisis. Hasta ahora, con el modelo genérico presentado se han obtenido los resultados presentados.

Si bien existe una disminución en la producción de  $H_2$  que está asociada al precalentamiento, también existe una disminución energética. Esto fue descrito en el capítulo anterior en la Figura 43. Pero para el caso actual, se muestra a continuación la Figura 52 que representa el voltaje total durante operación estable. Dentro de la figura, el voltaje se reduce un pequeño porcentaje, 0.1% respecto a 25°C en caso de que se alcanzaran las temperaturas indicadas en la Figura 52.



**Figura 52 Disminución del voltaje total en la instalación con precalentamiento**

### 4.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

La integración del CBM IIDEA100 con un electrolizador de tipo PEM permite aprovechar un diseño que tiene un historial de ingeniería confiable con pruebas, debido al gran historial de la tecnología de los ORC. En este caso, el hecho de que sea modular permite una mayor facilidad y flexibilidad en su instalación.

En el caso particular del CBM IIDEA100, se mostró la posibilidad de la variación de la potencia eléctrica generada en función de la variable de control que es el flujo másico de refrigerante R1233zd. A su vez, la temperatura de salida en el IC-02-001 del fluido de trabajo se verá afectada. Estas modificaciones en el flujo de refrigerante impactan la energía

Con esto se puede modificar la producción de  $H_2$ , de acuerdo con la potencia que se desee generar. De tal manera que se consiguen los resultados de la Tabla 22 que corresponden al rango de operación factible del CBM IIDEA100, cuya bomba actúa como el equipo delimitador por su mismo rango de operación. Con los límites operativos establecidos los resultados observados corresponden a la Figura 51, que muestra ambas posibilidades para la producción de  $H_2$ . Se muestra la producción con la acción de precalentamiento, uso en cascada; así como la posibilidad de evitar el precalentamiento. En todas las instancias el flujo de  $H_2$  se ve afectado negativamente por el precalentamiento; sin embargo, el decremento que se observa es negligible en comparación con el valor total del flujo. Mientras tanto, los resultados que se muestran en la Figura 52 indican la reducción en el consumo eléctrico a partir del voltaje total estimado en el electrolizador con el modelo matemático presentado anteriormente. Con el decremento mostrado en el voltaje se observa que de la misma manera que en la producción, es negligible. Sin embargo, el comportamiento exhibido es congruente con la información mostrada en capítulos anteriores, particularmente la Figura 36 dentro del capítulo anterior. A pesar de que sigue la línea que se ha indicado desde el principio de este trabajo es necesario hacer comprobaciones experimentales de este modelo, ya que se necesita corroborar con parámetros reales.

## 5 CONCLUSIONES GENERALES

El hidrógeno se está consolidando como un elemento clave en la transición energética global, con su demanda creciendo constantemente debido a su versatilidad en diversos sectores industriales; independientemente del método de producción. Sin embargo, la demanda actual se suplir, en su gran mayoría, con métodos de producción convencionales, que utilizan combustibles fósiles, porque la tecnología para electrólisis aún no se ha diversificado suficientemente como para volverla atractiva, y apenas comienzan los proyectos de generación de este tipo. Esto se evidencia en las estrategias nacionales registradas por la IEA.

A nivel mundial, los principales actores como la RPC, la UE y EEUU están implementando estrategias claras y fases de transición que enfatizan el uso del hidrógeno en el corto plazo, especialmente en aplicaciones industriales locales. China se enfoca en dominar toda la cadena de valor del hidrógeno, desde el desarrollo experimental hasta la aplicación industrial. Estados Unidos, por su parte, apuesta por la apertura, almacenamiento y escalamiento de la tecnología, buscando que el hidrógeno se vuelva económicamente viable y pueda habilitar sistemas de almacenamiento energético de larga duración para energías renovables. La Unión Europea se posiciona como desarrollador de tecnología necesaria para la producción de hidrógeno, particularmente en la fabricación de electrolizadores para países productores. La tendencia mundial es favorable para que el  $H_2$  sea un medio para la descarbonización de sectores que requieren de combustibles fósiles y no requieren vectores energéticos de largo alcance.

En México, aunque la LIE reconoce al hidrógeno como una tecnología aspirante a ser una energía limpia certificada, su aprovechamiento está condicionado a cumplir con criterios de eficiencia específicos según el método de producción. En 2022, la Cámara de Diputados promovió varias iniciativas para incentivar el uso de tecnologías de hidrógeno. A pesar de la dependencia del país en combustibles fósiles, hay un desarrollo creciente en el uso de fuentes energéticas alternativas; de las cuales México tiene un potencial significativo para su explotación. De estas alternativas se podría implementar la generación de  $H_2$  para que se llegara a suplir una demanda de 11 GW para 2050. Pero un proyecto de producción de hidrógeno verde en México debe tener la mayor cantidad de facilidades para su estudio, operación y posterior escalamiento. La tecnología debe estar en un punto alto de desarrollo, y la eficiencia debe ser una prioridad, sin sacrificar la vida útil de las piezas de las celdas debido a sus elevados costos.

Por lo tanto, la introducción del  $H_2$  es favorable en las matrices energéticas de diferentes países; siendo que algunos fueron mencionados en este trabajo, a través de sus estrategias de planeación energética. Mientras tanto, en México, se debería de abordar esta área de oportunidad. Lo cual implica crear una cadena de valor que aborde desde las fases de investigación académica hasta el aprovechamiento por el usuario final, implementando estrategias de reducción de costos a corto, mediano y largo plazo.

Para que el hidrógeno sea considerado verde, debe ser producido mediante la

electrólisis del agua, un proceso que solo requiere electricidad. En México, la presencia de recursos naturales alternativos como la energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica ofrece numerosas posibilidades para generar esta electricidad de manera sostenible. La energía geotérmica, en particular, es una opción atractiva debido a la posibilidad de utilizar ciclos orgánicos Rankine, que pueden operar con temperaturas del subsuelo menores a las necesarias para ciclos de potencia convencionales. México tiene un potencial geotérmico significativo en depósitos de baja y media entalpía, lo que permite la introducción de esta tecnología en más sitios y aumenta su presencia en la matriz energética nacional.

La tecnología de celdas PEM se destaca como una opción viable para la producción de hidrógeno verde debido a su desarrollo avanzado y la disponibilidad de información técnica. Con estas celdas, es posible acceder a una cantidad considerable de información, gracias al nivel de desarrollo alcanzado. Esta información es crucial para abordar futuras estimaciones de producción de hidrógeno verde. El análisis técnico de las celdas electrolíticas ha demostrado que factores como la temperatura y la densidad de corriente influyen directamente en la eficiencia y la cantidad de hidrógeno producido. La producción de hidrógeno está afectada por la temperatura de la reacción y la intensidad de corriente suministrada al equipo. Aunque, por el momento, los resultados indican que la producción de hidrógeno es solo ligeramente afectada por la temperatura. A partir de los resultados se observa que el incremento de la temperatura puede ayudar a reducir la energía requerida en el proceso; mientras que la producción se mantiene sin decrementos significativos. La eficiencia del proceso se incrementará proporcionalmente con la densidad de corriente utilizada.

Los modelos utilizados para la cuantificación del voltaje requerido son alentadores por el hecho de que, en efecto, la temperatura tiene un efecto benigno en el comportamiento, disminuyendo la cantidad de energía requerida para generar la reacción, lo cual se mostró como una reducción en el voltaje total. A pesar de que esta reducción es pequeña, sirve como una guía para futuros trabajos que pueden iniciar a partir de los modelos presentados y generar un modelo matemático más preciso con la ayuda de información experimental. Lo mismo se puede decir de los modelos de gases producidos, el comportamiento del  $H_2$  producido con precalentamiento y a temperatura estándar no difieren por cifras significativas. Pero se indica una disminución de producción de  $H_2$ , con una reducción de voltaje asociada, al aumentar la temperatura de reacción. Este comportamiento debe de ser comprobado experimentalmente para descartar o comprobar el comportamiento exhibido en este trabajo

Asimismo, para futuros trabajos, se puede iniciar un análisis de factibilidad socio-tecnico-económica para este proyecto, considerando que los costos nivelados de generación estimada para el CBMIIDEA100 son mejores prospectos que la alternativa de energías renovables con mayor atención del público general, la energía solar fotovoltaica. Este análisis debería de considerar los costos de producción, materiales, infraestructura (en el caso de explotar un sitio nuevo), almacenamiento, transportes, insumos, concesiones y permisos gubernamentales.

Posteriormente, la integración del CBM IIDEA100 con un electrolizador de tipo PEM permite aprovechar un diseño con un historial de ingeniería confiable; pruebas extensivas; y un diseño modular, lo que facilita la labor de instalación. El análisis de la variación de la

potencia eléctrica generada en función del flujo másico de refrigerante R1233zd muestra que las modificaciones en el flujo de refrigerante impactan en la potencia eléctrica disponible para el electrolizador y la producción de hidrógeno. De tal manera que si se desea la producción máxima se debe de mantener al CBM IIIDEA100 operando a su máxima capacidad posible.

En resumen, la implementación de proyectos de hidrógeno verde en México requiere de facilidades adecuadas para su estudio, operación y escalamiento. La adopción de tecnologías probadas, como las celdas PEM y el CBM IIIDEA100; investigación continua y optimización de los procesos legales. Especialmente en el contexto geotérmico, los puntos recién mencionados serán fundamentales para aprovechar al máximo el potencial del hidrógeno como vector energético sostenible y contribuir de manera significativa a la matriz energética nacional; contribuyendo al fortalecimiento de la estrategia de transición energética y aprovechando todos los recursos posibles que abundan en México.

## 6 REFERENCIAS

- ABENGOA. (2019). *Central termosolar de Agua Prieta II - 14MW*. Obtenido de <http://www.abengoa.com.mx/web/es/areas-de-actividad/ingenieria-y-construccion-industrial/energia-renovable/obra/Central-termosolar-Agua-Prieta-II-14-MW/>
- Aguirre Quezada, J. P. (2022). Trabajo Legislativo para convertir al Hidrógeno en una alternativa de combustible en México. *Mirada Legislativa*(221), 12. Recuperado el 14 de 06 de 2023, de <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/1871>
- Ahenkorah, A., Schei, T., Caceres Rodríguez, R., Devernay, J.-M., Freitas, M., Hall, D., . . . Liu, Z. (2012). Hydropower. En *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pág. 1088). New York, USA: Cambridge University Press.
- Ahmed, K., Farrok, O., Rahman, M., Ali, M., Haque, M., & Azad, A. K. (17 de 12 de 2020). Proton Exchange Membrane Hydrogen Fuel Cell as the Grid Connected Power Generator. *Energies*.
- Alarcón Flores, R. (2020). Sistema ORC CBM IIDEA de 100kw. *Sistema ORC CBM IIDEA de 100kw*. México: Instituto de Ingeniería, Grupo iiDEA.
- Alianza Energética México-Alemania. (2021). *Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación, Tomo VIII: Integración de resultados y recomendaciones generales*. GIZ, Alianzas energéticas bilaterales en países emergentes y en desarrollo. GIZ. Obtenido de [www.giz.de/en/worldwide/76471.html](http://www.giz.de/en/worldwide/76471.html)
- Aprea, J. L. (2022). Una mirada al hidrógeno verde y una nueva paleta de colores. *Ieds*, 2(2), 511 y 512. Recuperado el 09 de 06 de 2023, de [www.cenea.gov.ar/ieds](http://www.cenea.gov.ar/ieds)
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2018). *amdee*. Obtenido de Mapas eólicos: <https://amdee.org/mapas-eolicos.html>
- Asociación Mexicana de Energía Solar. (2023). *Asociación Mexicana de Energía Solar*. Obtenido de Centrales Solares: <https://asolmex.org/centrales-solares/>
- Astolfi, M. (2017). Technical options for Organic Rankine Cycle systems. *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems Technologies and Applications*, 67-89.
- Aviña Jiménez, H. M. (18 de Diciembre de 2018). Usos directos en geotermia, un tesoro energético por aprovechar. Obtenido de <http://www.proyectofose.mx/2018/12/18/usos-directos-en-geotermia-un-tesoro-energetico-por-aprovechar/>
- Bessarabov, D., & Millet, P. (2018). *PEM Water Electrolysis* (Vol. 1). (B. G. Pollet, Ed.) Londres, Reino Unido: Elsevier. doi:10.1016/C2016-0-00574-0
- BESUN ENERGY. (2019). Cuál es el precio de una instalación fotovoltaica de 100 kW. Madrid, España: CEMAER. Obtenido de <https://besunenergy.com/precio-de->

instalacion-fotovoltaica-de-100kw/

- Borgogno, F. G. (2010). *Compendio de propiedades Tabla de entalpía de formación, energía libre de Gibbs y entropía de formación de compuestos inorgánicos*. Neuquén.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Ciudad de México.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). *Ley de la Industria Eléctrica*. Ciudad de México.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). *Ley de la Industria Eléctrica*. Ciudad de México.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). *Ley de Transición Energética*. Ciudad de México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Cano Castillo, U., Becerra López, H. R., & González Díaz, A. (2021). Economía del hidrógeno. *Eficiencia energética*, 15-22.
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (7 ed.). Ciudad de México: McGraw Hill.
- Centro Nacional de Control de Energía. (2023). *Programa de Ampliación Y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y de los elementos de las Redes Generales de Distribución que corresponden al Mercado Eléctrico Mayorista*. Ciudad de México: Centro Nacional de Control de Energía.
- Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., . . . Schäfer, H. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 51, 4583-4762. doi:<https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>
- Comisión Europea. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Bruselas: Comisión Europea.
- Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma. (2022). *Plan a medio y largo plazo para el desarrollo de la industria de la energía del hidrógeno (2021-2035)*. China: División de Alta Tecnología.
- Department of Energy. (2023). *U.S. National Clean Hydrogen Strategy Roadmap*. Washington D.C.: Department of Energy.
- Deutsche gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2021). Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación. En I. Bonn y Eschborn, Alemania.
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* (3 ed.). Oxford: Elsevier.
- Embajada de Dinamarca. (2023). *EL POTENCIAL INDUSTRIAL DE MÉXICO EN LAS*

*CADENAS DE VALOR DE HIDRÓGENO VERDE*. Ciudad de México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

- Eng. Waseem Saeed, E. G. (2015). Modeling and Analysis of Renewable PEM Fuel Cell System. *Energy Procedia*, Volume 74, 87-101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.527>.
- Erickson, P. A., Hong-Yue, T., & Vernon, D. R. (2014). Reformation of Hydrocarbon Fuels. En *Hydrogen Handbook*. CRC Press.
- F. Marangio, M. S. (2009). Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 34(3), 1143-1158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.083>.
- Faa'ij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., . . . Pingoud, K. (2012). Bioenergy. En *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (págs. 209-332). New York: Cambridge University Press.
- Falcao, D., & Pinto, A. (2020). A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. *Journal of cleaner production*(261). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121184>
- Fernández, L. (13 de Nov de 2013). *Statista*. Obtenido de Weighted average cost for insalled onshore wind energy worldwide from 2010 to 2022: <https://www.statista.com/statistics/506774/weighted-average-installed-cost-for-onshore-wind-power-worldwide/>
- Fernández-Bolaños Badía, C. (2005). *Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro*. (U. d. Sevilla, Ed.) Sevilla, España: Departamento de Energética y Mecánica de Fluidos. Recuperado el 06 de 2023
- G20. (2023). *Acerca del G20*. Obtenido de Miembros del G20.
- Gacía-Valverde, R., Espinosa, N., & Urbina , A. (2012). Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1927-1938. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.027>.
- Global Geothermal Alliance. (SF). *Global Geothermal Alliance*. Obtenido de Mexico: <https://www.globalgeothermalalliance.org/Regions-and-countries/Countries/Mexico>
- Godínez del Río, E. (2022). Proposición con punto de acuerdo, a fin de exhortar a la SENER a incluir el hidrógeno verde en la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, del Dip. Enrique Godínez del Río, del Grupo Parlamentario del PAN. Ciudad de México: Cámara de Diputados.
- Herath, H., Wijewardane, M., Ranasinghe, R., & Jayasekera, J. (2020). Working fluid selection of Organic Rankine Cycles. *Energy Reports*, 6(9), 680-686. Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720315754>

- Hofrichter, A., Rank, D., Heberl, M., & Sterner, M. (2022). *Determination of the optimal power ratio between electrolysis and renewable energy to investigate the effects on the hydrogen production costs*. Regensburg: ELSEVIER. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.263>
- Houcheng, Z., Guoxing, L., & Jincan, C. (2010). *Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production*. XIAMEN: ELSEVIER.
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. IEA. Recuperado el 07 de 2023, de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IEA. (2021). *Hydropower Special Market Report*. Paris: IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>
- IEA. (2021). *Net Zero by 2050 A road for the global energy sector*. International Energy Agency.
- IEA. (2022). *Global Hydrogen Review 2022*. International Energy Agency. Recuperado el 09 de 06 de 2023, de [www.iea.org](http://www.iea.org)
- IEA. (2023). *Renewable Energy Market Update*. IEA.
- Iglhaut, C. (04 de 04 de 2023). *deutschland.de*. Recuperado el 26 de 06 de 2023, de <https://www.deutschland.de/es/topic/medio-ambiente/hidrogeno-verde-y-transicion-energetica-energias-renovables#:~:text=El%20Gobierno%20alem%C3%A1n%20apoya%20el,la%20econom%C3%ADa%20y%20la%20sociedad>.
- IMCO. (2022). *Prodesen refleja una falta de compromiso del Estado mexicano con el medio ambiente*. Ciudad de México: IMCO. Recuperado el 2023, de [https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2022/06/Nota-informativa\\_Prodesen\\_22010603.pdf](https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2022/06/Nota-informativa_Prodesen_22010603.pdf)
- IRENA. (2022). *Costos de generación de energías renovables en 2021*. Abu Dabi: IRENA.
- IRENA. (2022). *Geothermal*. Obtenido de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy>
- IRENA. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. Abu Dhabi: IRENA.
- Islas Samperio, J., & Mat3nez Jim3nez, A. (abril-junio de 2010). Bioenerg3a. *Ciencia*, 30-39.
- ISO. (1990). *ISO TC/197 Hydrogen Technology*. Qu3bec: ISO.
- Jutglar Banyeres, L. (2012). *Generaci3n de energ3a fotovoltaica*. Barcelona: Marcombo.
- LEONI. (s.f.). *Conductor materials: Stainless Steel*. Obtenido de Basic properties of stainless

steel: <https://www.leoni-wire-products-solutions.com/en/materials/conductor-materials/stainless-steel/>

Leung, M., Ni, M., & Leung, D. Y. (2014). Solid Oxide Electrolyzer Cells. En *Hydrogen Handbook*. CRC Press.

Linares Tapia, V. (2022). *Desarrollo de ingeniería básica, de detalle y análisis tecno-económico de una planta de ciclo binario de 100kW de capacidad operada con geotermia*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Llopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Gráficas Arias Montano. Obtenido de <https://www.fenercom.com/publicacion/guia-de-la-energia-geotermica-2008/>

Macchi, E. (2017). Theoretical basis of the Organic Rankine Cycle. En E. Macchi, & M. Astolfi, *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems* (págs. 3-24). Milan: Elsevier.

Marcelino Mejía, L. L. (2022). *Evaluación Termoeconómica de Intercambiadores de Calor para Sistemas ORC Operados con Recursos de Baja y Media Entalpía*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Nallapaneni Manoj, K., Srikar, D., & Jagathpally Bhagwan, R. (2018). Availability factor of a PV power plant: evaluation based on generation and inverter running periods. *Energy Procedia*, 147, 71-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.035>.

ONU. (14 de 11 de 2022). *Naciones Unidas*. Recuperado el 2023, de Noticias Naciones Unidas:  
<https://news.un.org/es/story/2022/11/1516872#:~:text=Crisis%20clim%C3%A1tica&text=%E2%80%9C%20Los%20%20ADderes%20del%20G20%20pueden,al%20pl aneta%20en%20su%20conjunto>.

ONU. (7 de 11 de 2022). *Noticias Naciones Unidas*. Obtenido de Pacto de solidaridad climática, alertas tempranas, migrantes en el Mediterráneo, pesca ilegal... Las noticias del lunes:  
<https://news.un.org/es/story/2022/11/1516687#:~:text=El%20proyecto%20busca%20proteger%20a,fen%C3%B3menos%20meteorol%C3%B3gicos%20extremos%20y%20peligrosos>.

Prol Ledesma, R. (1996). *El calor de la Tierra*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.

Prol-Ledesma, R. M.-d.-V.-A.-O. (2018). *Heat flow map and geothermal resources in Mexico*. México: Terra Digitalis. doi:<https://doi.org/10.22201/igg.25940694.2018.2.51>

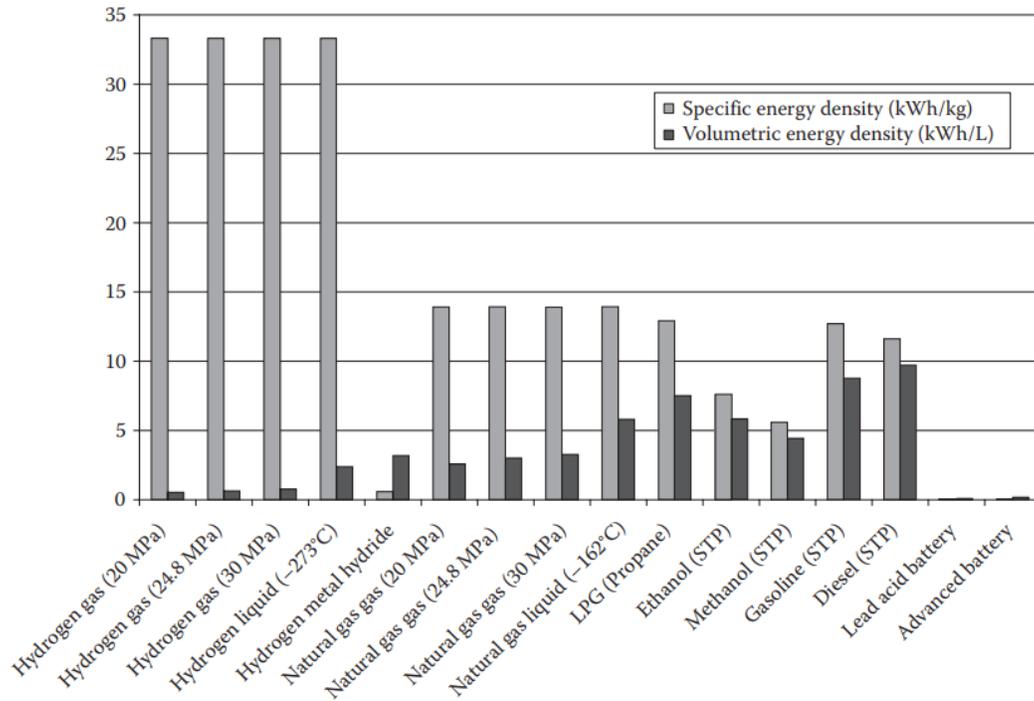
Rayner-Canham, G. (2000). *Química Inorgánica Descriptiva* (2 Edición ed.). México: Prentice Hall.

- Research Coordination Network on Carbon Capture, Utilization and Storage. (2013). *What is CCUS?* (RCN-CCUS) Recuperado el 13 de 7 de 2023, de <https://www.aiche.org/ccusnetwork/what-ccus#:~:text=Carbon%20Capture%2C%20Utilization%2C%20and%20Storage%20%28CCUS%29%20encompasses%20methods,utilization%20and%20determining%20safe%20and%20permanent%20storage%20options.>
- Rodríguez Cuesta, J. (2016). *Electrólisis a alta temperatura*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/53557/TFG-JOSERODR%C3%83%20GUEZCUESTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Secretaria de Energía . (2020). *Estrategia de Transición para promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más limpios, en términos de la Ley de Transición Energética*. Ciudad de México: Secretaria de Energía .
- Secretaria de Energía. (2021). *Sistema de Información Energética*. Obtenido de Balance Nacional de Energía: Hidroenergía: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=VAE307>
- Secretaría de Energía. (2021). *Sistema de Información Energética*. Obtenido de Evolución de la Capacidad Instalada por Tipo de Tecnología 2018-2022: [https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=DIPS\\_SE\\_C33\\_ESP](https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=DIPS_SE_C33_ESP)
- Secretaria de Energía. (2023). *Sistema de Información Energética*. Obtenido de Sistema de Información Energética: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE14C01>
- SERO Pump Systems. (2019). *SERO*. Obtenido de Side channel pump PN40 self-priming with special NPSH stage: [www.seroweb.de](http://www.seroweb.de)
- Smolinka, T. (2010). *PEM Water Electrolysis - Present Status of Research and Development*. Essen: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- SOLARGIS. (2017). *Mapas de recursos solares de México*. Obtenido de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Spadacini, C., Xodo, L. G., Quaiá, M., & Olona, O. (2017). Geothermal energy exploitation with Organic Rankine Cycle technologies. *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems Technologies and Applications*, 471-525.
- Tecnológico Nacional de México . (2022). *Nodo Binacional de Innovación Universitario*. Obtenido de Aerogenerador de eje vertical: [https://nobiunam.mx/?page\\_id=2655](https://nobiunam.mx/?page_id=2655)
- Ulleberg, O. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 21-33. Obtenido de [www.elsevier.com/locate/ijhydene](http://www.elsevier.com/locate/ijhydene)

- United States Geological Service. (2014). *Understanding Plate Motions*. Obtenido de [https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/Plate%20tectonics\\_lesson%20bundle.pdf](https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/Plate%20tectonics_lesson%20bundle.pdf)
- United States Geological Service. (2016). *Hydrothermal Resources Fact Sheet*. Geothermal Technologies Office. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/geothermal/articles/hydrothermal-resources-fact-sheet#:~:text=A%20geothermal%20resource%20requires%20fluid,manifestations%20of%20the%20underlying%20resource>.
- United States Geological Service. (SF). *Tectonic Plates of the Earth*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/images/tectonic-plates-earth>
- Veziroglu, T. N., & Barbir, F. (1992). Hydrogen: The Wonder Fuel. *Int. J. Hydrogen Energy*, 17(6), 391-404.
- Villarrubia López, M. (2013). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Barcelona: Alfaomega.
- World Wind Energy Association. (2022). *WWEA Half-year Report 2022*. Bonn: WWEA.
- Zhaoyang, Z., Maanish, S., Ibrahim, M., Tirumala, U., Aliashim, A., Asiful, H. S., & Van Fang, L. (2023). Multi-criteria thermoeconomic optimization of a geothermal energy driven green hydrogen production plant coupled to an alkaline electrolyzer. *Process Safety and Environmental Protection*, 154-165.

## ANEXOS DEL CAPÍTULO 1

### DENSIDAD ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO



**FIGURE 3.1**

A comparison of various fuels. Hydrogen has the highest energy per unit weight but the lowest energy per unit volume. Currently, diesel, gasoline, and LPG are common fuel for transportation application.

**Figura 53 Densidad energética, en base volumétrica y másica, de distintos recursos energético (Erickson, Hong-Yue, & Vernon, 2014)**

## ANEXOS DEL CAPÍTULO 2

### CAPACIDAD INSTALADA DE CFE Y PERMISIONARIOS HASTA 2036

Tabla 26 Capacidad instalada de la CFE y del resto de los permisionarios contemplando las adiciones hasta 2036 (MW) ajustado por factor de planta, tomada de (IMCO, 2022)

Tecnología	Capacidad instalada (MW)	Factor de planta medio (%)	Máxima generación (GWh)
Hidroeléctrica	14,474	40	50,717
Geotermoeléctrica	1,001	73	6,401
Eoloeléctrica	12,236	27	28,941
Fotovoltaica	20,890	16	29,279
Bioenergía	378	21	695
Nucleoeléctrica	4,108	77	27,709
Cogeneración eficiente	3,643	55	17,552
Ciclo combinado	47,160	56	231,348
Térmica convencional	11,793	33	34,091
Turbogás	3,917	23	7,892
Combustión interna	2,167	10	1,898
Carboeléctrica	5,463	61	29,192
<b>TOTAL</b>	<b>127,230</b>		<b>465,716</b>

# SEGUIMIENTO ANUAL DEL DESARROLLO DE LA MATRIZ ENERGÉTICA MEXICANA

Tabla 27 Evolución de la energía producida (GWh) 2017-2022 por tipo de energía (Centro Nacional de Control de Energía, 2023)

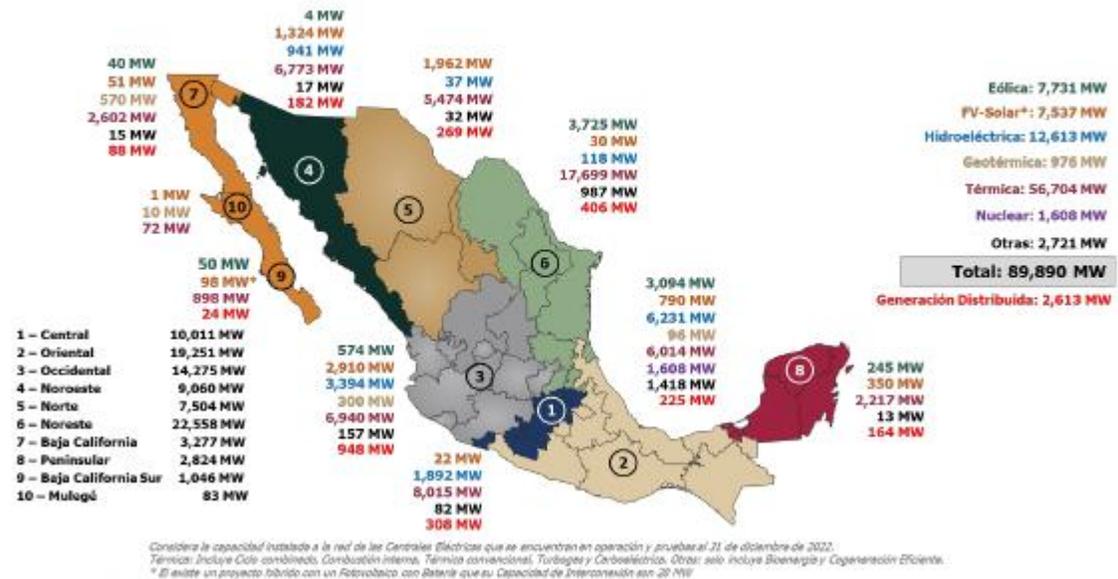
ANEXO 4.6. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA PRODUCIDA (GWh) 2017 - 2022 POR TIPO DE TECNOLOGÍA

Tecnología/fuente de energía	2017	2018	2019	2020	2021 <sup>v</sup>	2022 <sup>vi</sup>
Hidroeléctrica	31,664	32,234	23,602	26,817	34,717	35,561
Geotermoelectrica	5,747	5,065	5,061	4,575	4,243	4,412
Eoloelectrica	10,456	12,435	16,727	19,703	21,075	20,314
Fotovoltaica <sup>vi</sup>	349	2,176	8,394	13,528	17,069	16,278
Bioenergía	585	600	669	600	582	617
Híbrido FV-Batería						12
Nucleoelectrica	10,572	13,200	10,881	10,864	11,606	10,539
Ciclo Combinado	159,788	164,864	177,393	188,298	188,758	198,635
Térmica convencional <sup>vii</sup>	42,884	39,345	38,020	22,405	22,196	20,001
Turbogás <sup>viii</sup>	9,796	10,752	12,197	10,103	12,381	11,511
Combustión interna <sup>ix</sup>	2,374	2,667	3,266	2,930	2,196	1,889
Carboelectrica <sup>x</sup>	28,665	27,347	21,611	12,525	8,704	14,194
<b>TOTAL</b>	<b>302,880</b>	<b>310,685</b>	<b>317,820</b>	<b>312,348</b>	<b>323,526</b>	<b>333,963</b>

<sup>v</sup> Incluye Lecho fluidizado, combustibles diversos como Gas Natural, Diésel, Combustóleo, Coque  
<sup>vi</sup> Generación Neta de la CFE y del resto de los permisionarios ene-dic 2021.  
<sup>vii</sup> Generación Neta de la CFE y del resto de los permisionarios ene-dic 2022.  
<sup>viii</sup> Para el año 2022, la Central Termoelectrica Presidente Plutarco Elías Calles generó 65.7 % fueron producidos con combustóleo.  
<sup>ix</sup> Combustible Gas Natural, Diésel, Combustóleo  
<sup>x</sup> Incluye sistema híbrido de Fotovoltaico-Batería

## CAPACIDAD INSTALADA EN MÉXICO HASTA DICIEMBRE 2022

Figura 4.4.3. Capacidad instalada a la Red Eléctrica, en operación y pruebas del SEN (MW) al 31-diciembre-2022



Fuente: CRE, CFE y Participantes del MEM. Nota: La GD es solo GD-FV

Figura 54 Capacidad instalada a la Red Eléctrica, en operación y pruebas del SEN (MW) al 31-diciembre-2022 (Centro Nacional de Control de Energía, 2023)

## PLANO DE LAS PLACAS TECTÓNICAS DE LA CORTEZA TERRESTRE

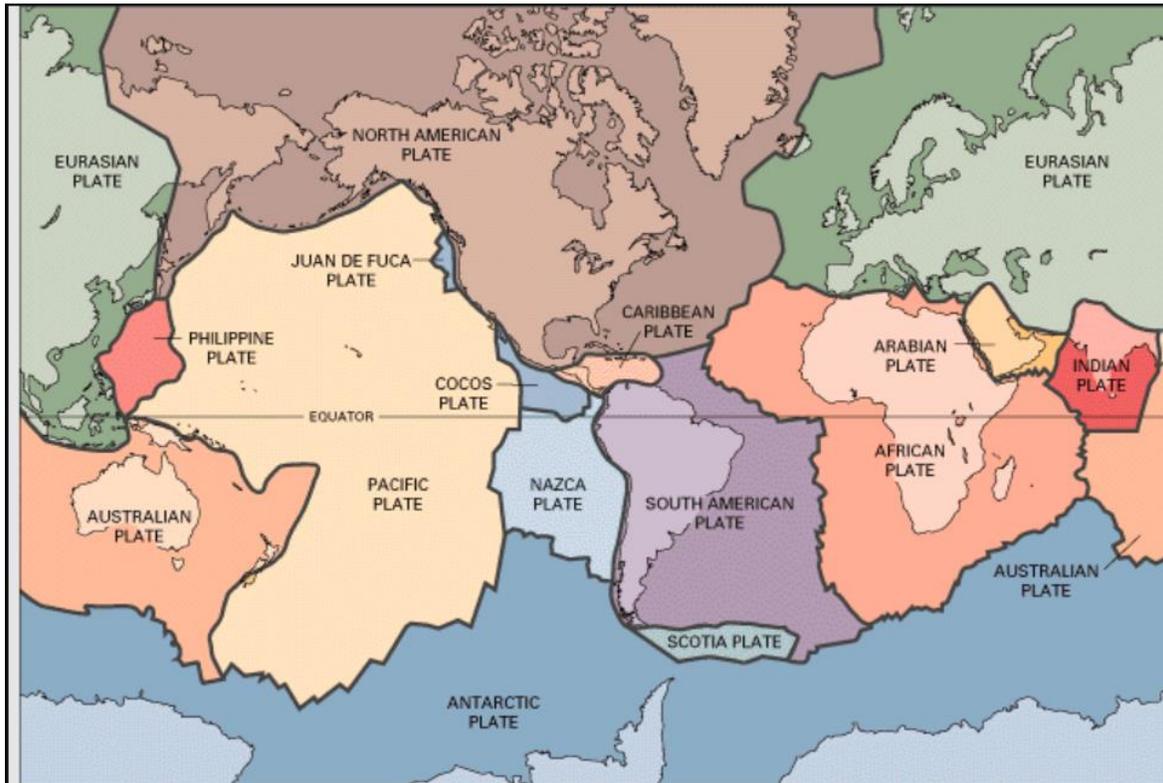


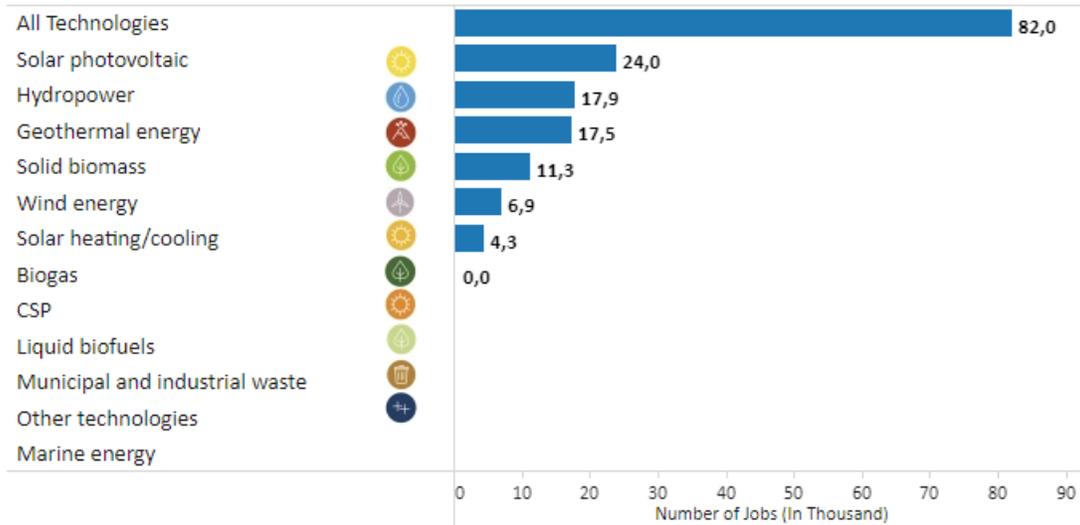
Figura 55 Disposición de las placas tectónicas que componen la corteza terrestre (United States Geological Service, SF)

## Renewable Energy Employment by Technology in 2021



Show for

Mexico



Source IRENA and ILO (2022), Renewable energy and jobs: Annual review 2022, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi and International Labour Organization, Geneva. Data are principally for 2021, with some dates for 2020 and a few instances in which only earlier information is available. The data for hydropower include direct employment only and for other technologies include both direct and indirect employment wherever possible. 'Other Technologies' include jobs not broken down by individual renewable energy technologies.

+ a b | e a u



**Figura 56** Uso de energías renovables , por tecnología en México, 2021, IRENA  
<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy>

# LISTA DE FLUIDOS DE TRABAJO PARA CICLOS ORGÁNICOS RANKINE

**Tabla 28 Lista de fluidos de trabajo y sus propiedades (Macchi, 2017)**

fluid	chemical formula	MDM	atoms	$T_{crit}$ , °C	$p_{crit}$ , bar	$T_{min}$ , °C	$T_{max}$ , °C	$p_{max}$ , bar	H	F	I	GWP	
Linear alkanes	propane	$CH_3-CH_2-CH_3$	44.10	11	96.7	42.5	-188	376.9	10000	1	4	0	4-6
	iso-butane	$(CH_3)_2-CH-CH_3$	58.12	14	135	36.3	-159	301.9	350	1	4	0	
	butane	$CH_3-(CH_2)_2-CH_3$	58.12	14	152	38	-138	301.9	690	1	4	0	
	neo-pentane	$(CH_3)_3-C-CH_3$	72.15	17	161	32	-16.6	276.9	2000	1	4	0	
	iso-pentane	$(CH_3)_2-CH-CH_2-CH_3$	72.15	17	187	33.8	-161	226.9	10000	1	4	0	
	pentane	$CH_3-(CH_2)_3-CH_3$	72.15	17	197	33.7	-130	326.9	1000	1	4	0	
	iso-hexane	$(CH_3)_2-CH-(CH_2)_2-CH_3$	86.18	20	225	30.4	-154	276.9	10000	2	3	0	
	hexane	$CH_3-(CH_2)_4-CH_3$	86.18	20	235	30.3	-95.3	326.9	1000	2	4	0	
	heptane	$CH_3-(CH_2)_5-CH_3$	100.20	23	267	27.4	-90.6	326.9	1000	1	3	0	
	octane	$CH_3-(CH_2)_6-CH_3$	114.23	26	296	25	-56.8	326.9	1000	1	3	0	
	nonane	$CH_3-(CH_2)_7-CH_3$	128.26	29	321	22.8	-53.5	326.9	8000	1	3	0	
	decane	$CH_3-(CH_2)_8-CH_3$	142.28	32	345	21	-29.7	401.9	8000	1	2	0	
dodecane	$CH_3-(CH_2)_{10}-CH_3$	170.33	38	385	18.2	-9.55	426.9	7000	1	2	0		
Cyclo alkanes	cyclo-pentane	cycle $(CH_2)_5$	70.13	15	239	45.7	-93.4	326.9	2000	1	3	0	
	cyclo-hexane	cycle $(CH_2)_6$	84.16	18	280	40.8	6.32	426.9	800	1	3	0	
	methyl-cyclo-hexane	cycle $(CH_2)_6-CH_3$	98.19	21	299	34.7	-126	326.9	5000	1	3	0	
	n-propyl-cyclo-hexane	cycle $(CH_2)_6-CH_2-(CH_2)_2$	126.24	27	358	28.6	-95	376.9	500	1	3	0	
Alkene and alkynes	1-butene	$CH_2=C-(CH_2)_2$	56.11	12	145	40.1	-141	276.9	500	1	4	0	
	2-methyl-1-propene	$CH=C-CH_2-CH_3$	56.11	12	146	40.1	-185	251.9	700	1	4	0	
	trans-2-butene	$CH_3-CH=CH-CH_3$	56.11	12	155	40.3	-106	251.9	500	1	4	0	
	cis-2-butene	$CH_3-CH=CH-CH_3$	56.11	12	163	42.3	-139	251.9	500	1	4	0	
	benzene	cycle $(CH)_6$	78.11	12	289	49.1	5.55	476.9	5000	2	3	0	
	methyl-benzene	cycle $(CH)_6-CH_3$	92.14	15	319	41.3	-95.2	426.9	5000	2	3	0	
Alcohols and ketons	dimethyl ether	$CH_3-O-CH_3$	46.07	9	127	53.4	131.7	525	400	1	4	1	
	acetone	$(CH_3)_2-C=O$	58.08	10	235	47	178.5	550	7000	1	3	0	
	methanol	$CH_3-OH$	32.04	6	240	82.2	175.6	620	8000	1	3	0	
	ethanol	$CH_3-CH_2-OH$	46.07	11	242	62.7	250	650	2800	1	3	0	
Refrigerant fluids	R125	$CF_3-CHF_2$	120.02	8	66	36.2	172.5	500	600	1	0	0	3500
	R218 (perfluoro propane)	$CF_3-CF_2-CF_3$	188.02	11	71.9	26.4	125.5	440	200	1	0	0	8830
	R143a	$CF_3-CH_3$	84.04	8	72.7	37.6	161.3	650	1000	1	4	0	4470
	R32	$CH_2F_2$	52.02	5	78.1	57.8	136.3	435	700	1	4	1	675
	R1234yf	$CH_3-CH-CF_3$	114.04	9	94.7	33.8	220	410	300	1	4	0	4
	R134a	$CF_3-CH_2F$	102.03	8	101	40.6	169.9	455	700	1	0	1	1430
	R227ea	$CF_3-CH_2F-CF_3$	170.03	11	102	29.3	146.4	475	600	1	0	1	3220
	R161	$CFH_2-CH_3$	48.06	8	102	50.1	130	400	500	1	4	0	12
	R1234ze	$CHF=CH-CF_3$	114.04	9	109	36.3	168.6	420	200	1	4	0	
	perfluoro butane	$CF_3-(CF_2)_2-CF_3$	238.03	14	113	23.2	189	500	300	1	0	0	
	R152a	$CHF_2-CH_3$	66.05	8	113	45.2	154.6	500	600	1	4	1	124
	perfluoro cycle propane	cycle $-(CF_2)_3-$	200.04	12	115	27.8	233.4	623	600	2	0	0	10300
	R236fa	$CF_3-CH_2-CF_3$	152.04	11	125	32	179.5	500	400	1	0	0	9810
	R236ea	$CF_3-CF_2-CHF_2$	152.04	11	139	34.2	242	500	600	1	0	0	9810
R245fa	$CF_3-CH_2-CHF_2$	134.05	11	154	36.5	171.1	440	2000	2	1	0	1030	
R1233zd	$CF_3-CH=CHCl$	130.50	9	166.45	36.237	-78	276.85	1000	2	0	0	1	
R365mfc	$CF_3-CH_2-CH_2-CHF_2$	148.07	14	187	32.7	239	500	350	0	4	1	794	
siloxanes	MDM	$C_6H_{16}OSi_2$	162.38	27	246	19.4	273	673	300	1	4	0	
	MDM	$C_6H_{12}O_2Si_3$	236.53	37	291	14.2	187.2	673	300	1	3	1	
	D4	$C_8H_{20}O_4Si_4$	296.62	40	313	13.3	300	673	300	1	2	0	
	MD2M	$C_{10}H_{30}O_2Si_2$	310.69	47	326	12.3	205.2	673	300	1	2	1	
	D5	$C_{10}H_{20}O_4Si_4$	370.77	50	346	11.6	300	673	300	1	2	0	
	MD3M	$C_{12}H_{30}O_2Si_3$	384.84	57	355	9.45	192	673	300	1	1	0	
	D6	$C_{12}H_{20}O_4Si_6$	444.92	60	373	9.61	270.2	673	300	1	2	0	
	MD4M	$C_{14}H_{20}O_2Si_4$	458.99	67	380	8.77	300	673	300	1	1	0	
ammonia	$NH_3$	17.03	4	132	113	-77.7	426.9	10000	3	1	0		
water	$H_2O$	18.02	3	374	221	0.01	1727	10000	0	0	0		

## EQUIPOS PARA UN ORC

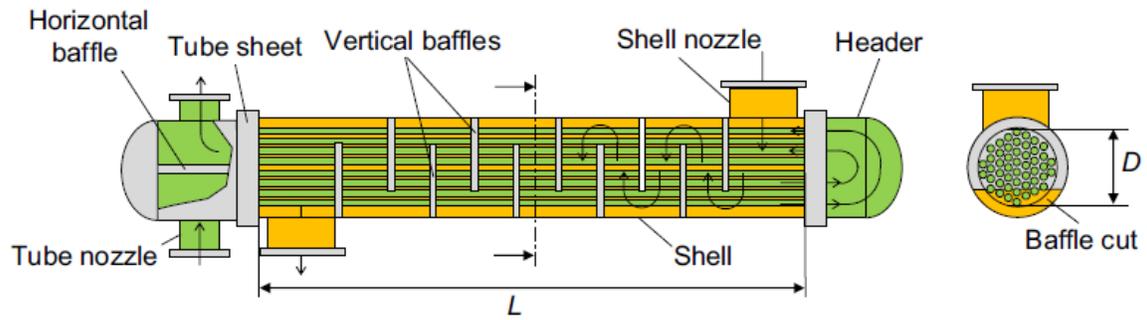


Figura 57 Intercambiador de calor de tubos y coraza (Astolfi, 2017)

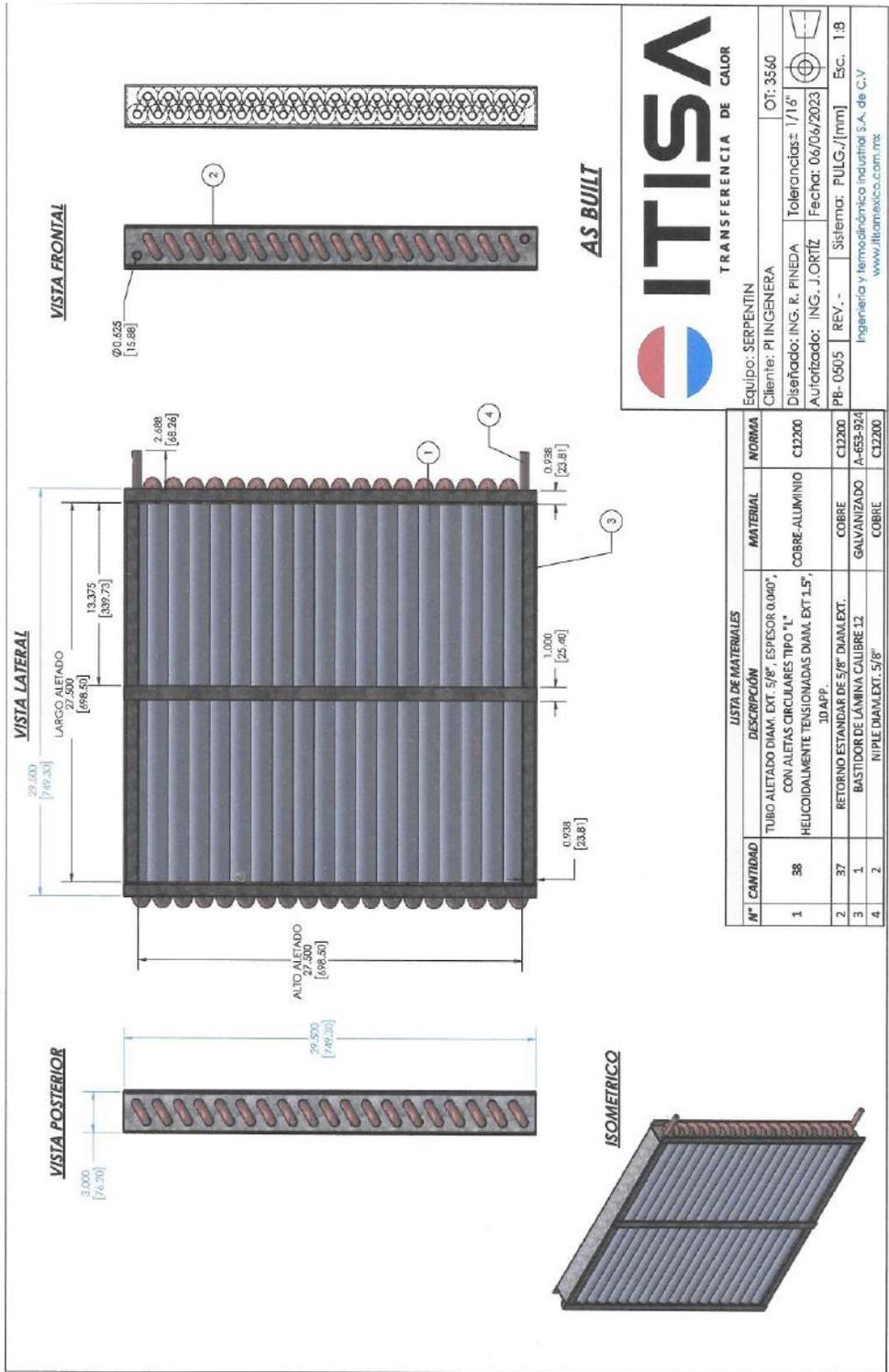
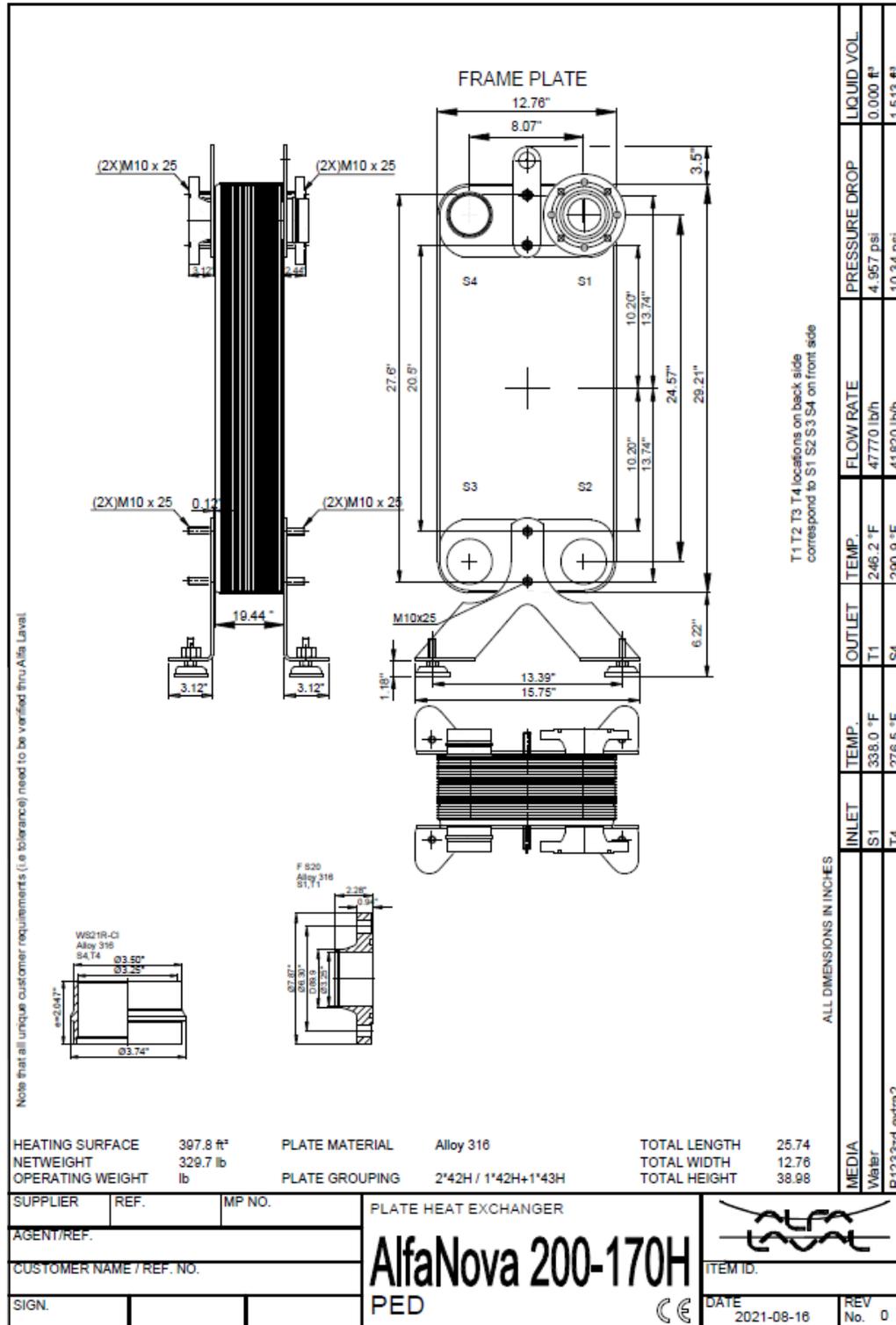


Figura 58 Intercambiador de calor de serpentin, diseñado y fabricado por ITISA.



ANEXOS DEL CAPÍTULO 3

## MEMORIA DEL CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA CONDICIONES ESTÁNDAR DE LA REACCIÓN ELECTROLÍTICA

Considerando que las condiciones estándar son: 1 atm y 25°C y que se hará el desarrollo para la reacción estándar de la electrólisis que se recupera de la Ecuación 9, se hace el cálculo de  $\Delta S_R^0$ ,  $\Delta H_R^0$  y  $\Delta G_R^0$ .

De tablas de (Borgogno, 2010) se obtienen valores de entalpías y entropías de formación bajo condiciones estándar.

$$\begin{aligned} s_{H_2O}^0 &= 69.91 \frac{J}{mol \cdot K} & h_{H_2O}^0 &= -285.83 \frac{kJ}{mol \cdot K} \\ s_{H_2}^0 &= 130.58 \frac{J}{mol \cdot K} & h_{H_2}^0 &= 0 \frac{kJ}{mol \cdot K} \\ s_{O_2}^0 &= 205.03 \frac{J}{mol \cdot K} & h_{H_2}^0 &= 0 \frac{kJ}{mol \cdot K} \end{aligned}$$

Entonces, se realiza el cálculo de las propiedades mencionadas.

$$\begin{aligned} \Delta S_R^0 &= \sum_{i=1}^{prod} (n_i s_i^0) - \sum_{i=1}^{reactivos} (n_j s_j^0) \\ \Delta S_R^0 &= \left[ 1 \cdot s_{H_2}^0 + \frac{1}{2} \cdot s_{O_2}^0 \right] - [1 \cdot s_{H_2O}^0] \\ \Delta S_R^0 &= 163.1795 \frac{J}{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_R^0 &= \sum_{i=1}^{prod} (n_i h_i^0) - \sum_{i=1}^{reactivos} (n_j h_j^0) \\ \Delta H_R^0 &= \left[ 1 \cdot h_{H_2}^0 + \frac{1}{2} \cdot h_{O_2}^0 \right] - [1 \cdot h_{H_2O}^0] \\ \Delta H_R^0 &= 285.83 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G_R^0 &= \Delta H_R^0 - T_R \cdot \Delta S_R^0 \\ \Delta G_R^0 &= 237.17 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Estos resultados son congruentes con (Borgogno, 2010)

## MEMORIA DE CÁLCULO DE PROPIEDADES PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE REACCIÓN

Considerando que las condiciones son diferentes del estándar (1 atm y 25°C) y que se hará el desarrollo para la reacción estándar de la electrólisis que se recupera de la Ecuación 9, se hace el cálculo de  $\Delta c_p$ ,  $\Delta S_R$ ,  $\Delta H_R$  y  $\Delta G_R$ .

De tablas (Rayner-Canham, 2000) se obtienen los valores de las capacidades caloríficas estándar a presión constante de los productos y reactivos de la reacción.

$$c_{p_{H_2O}}^0 = 75.29 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$c_{p_{H_2}}^0 = 28.82 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$c_{p_{O_2}}^0 = 29.35 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Entonces, se realiza el cálculo de las propiedades mencionadas.

$$\Delta c_p = \sum_{i=1}^{prod} (n_i c_{p_i}^0) - \sum_{i=1}^{reactivos} (n_j c_{p_j}^0)$$

$$\Delta c_p = \left[ 1 \cdot c_{p_{H_2}}^0 + \frac{1}{2} \cdot c_{p_{O_2}}^0 \right] - [1 \cdot c_{p_{H_2O}}^0]$$

$$\Delta c_p = -31.795 \frac{J}{K}$$

$$\Delta H_R = \Delta H_R^0 + \Delta c_p \cdot (T_R - T_R^0)$$

$$\Delta H_R = 285.83 \text{ kJ} - 31.795 \frac{J}{K} \cdot (T_R - 298.15K)$$

$$\Delta S_R = \Delta S_R^0 + \Delta c_p \cdot \ln\left(\frac{T_R}{T_R^0}\right)$$

$$\Delta S_R = 163.1795 \frac{J}{K} - 31.795 \frac{J}{K} \cdot \ln\left(\frac{T_R}{298.15K}\right)$$

$$\Delta G_R = \Delta H_R - T_R \cdot \Delta S_R$$

$$\Delta G_R = 298.83 \text{ kJ} - 31.795 \frac{J}{K} (T_R - 298.15K) - T_R 163.1795 \frac{J}{K} - 31.795 \frac{J}{K} \cdot \ln\left(\frac{T_R}{298.15K}\right)$$

# HOJA DE DATOS TÉCNICOS DE LA MEMBRANA PEM



## AEMION+<sup>®</sup> REINFORCED MEMBRANES FOR WATER ELECTROLYSIS

### Thickness and Reinforcement Properties

Membrane Type	Typical Thickness (µm)	IEC <sup>1</sup> (meq/g)	Reinforcement
AF3-HWK9-75-X	75	2.1-2.6	Woven PEEK

Physical Properties <sup>2</sup>	MD	TD	Test Method
Tensile Strength, MPa	54 - 60	53 - 58	ASTM 638
Young's Modulus, MPa	600 - 670	600 - 650	ASTM 638
Elongation to break, %	24 - 30	20 - 28	ASTM 638

Hydrolytic Properties <sup>2</sup>			
Water Uptake			
to water soaked, 80 °C	< 15%		ASTM D570
Linear Expansion			
to water soaked, 80 °C	< 3%		ASTM D570
Z-Expansion			
to water soaked, 80 °C	< 8%		ASTM D570

Electrochemical Properties			
Area Resistance, mΩ · cm <sup>2</sup>	< 205		Internal <sup>4</sup>
Hydrogen permeability, NpL·cm <sup>-2</sup> ·min <sup>-2</sup> ·bar <sub>a</sub> <sup>-2</sup>	< 4.0		Internal <sup>5</sup>

Chemical Stability			
Chemical Stability	0.5 - 2 M KOH, 80 °C		Internal <sup>6</sup>
Recommended Operating Condition	1 M KOH, 70 °C		

Other Properties			
Maximum Processing Temperature	150 °C		Internal <sup>7</sup>
Polymer Tg	> 300 °C		ASTM E1131/ISO 11358
Counter-ions as produced	I-/Cl-		

### Notes

1. Polymer IEC in the hydroxide (OH<sup>-</sup>) counter-ion form.
2. Measured at 22 °C fully hydrated
3. Measured from dried to equilibrated in DI water at 22 °C
4. Measured in water electrolysis conditions at 50 °C, 1 M KOH, OCV, BOL expectations 220 ± 50, determined by effectiveness of exchange into hydroxide form and zero-gap configuration.
5. Not a standard test. Hydrogen permeability is measured electrochemically in internal testing condition for reference only and is not necessarily representative of customer conditions. It is recommended to verify permeability in individual systems once received.
6. Measured ex-situ by determining steady-state mechanical strength, conductivity, & IEC at specified temperature and regularly exchanged KOH electrolyte.
7. Determined by thermogravimetric analysis (TGA) at 2 °C/min in as-produced form. Polymer can be rendered stable above 200 °C, please contact Ionomr if higher temperature conditions are desired

These are prototype materials only intended to be used for development activities and not intended for production items. Product information is to be used as a guide only, not a specification & is subject to change at any time.

## Ordering Information

Part Number	Description
AF3-HWK9-75-X-032	Aemion+® 75µm Reinforced Anion Exchange Membrane Roll, 32cm width
AF3-HWK9-75-X-064	Aemion+® 75µm Reinforced Anion Exchange Membrane Roll, 64cm width
AF3-HWK9-75-X-0A4	Aemion+® 75µm Reinforced Anion Exchange Membrane, A4 sheet

## AEMION+® IONOMERS: DRY RESIN

Ionomer Type	IEC <sup>1</sup> (meq/g)	Conductivity Cl <sup>-</sup> (mS/cm)	Water Uptake <sup>2</sup> OH <sup>-</sup> (%)	Water Uptake <sup>2</sup> Cl <sup>-</sup> (%)
AP3-HNN9-00-X	2.1-2.6	4 - 9	20 - 50	10 - 15

### Notes

1. IEC in the hydroxide (OH<sup>-</sup>) counter-ion form, calculated by NMR. Recommend silver nitrate for measurement by titration.
2. Approximate swelling properties when cast into membrane form at 25 - 50 µm, at 80°C.

These are prototype materials only intended to be used for development activities and not intended for production items. Product information is to be used as a guide only, not a specification & is subject to change at any time.

### Related Documents

APN-AEM-1003	Instructions on pre-treatment and activation of membranes, complete MEAs, or ionomer containing electrodes prior to use.
APN-AEM-1005	Instructions on solubility and processing of ionomer solutions.

## GRAFICAS DE FLUJOS MÁSICOS PARA REACTIVOS/PRODUCTOS

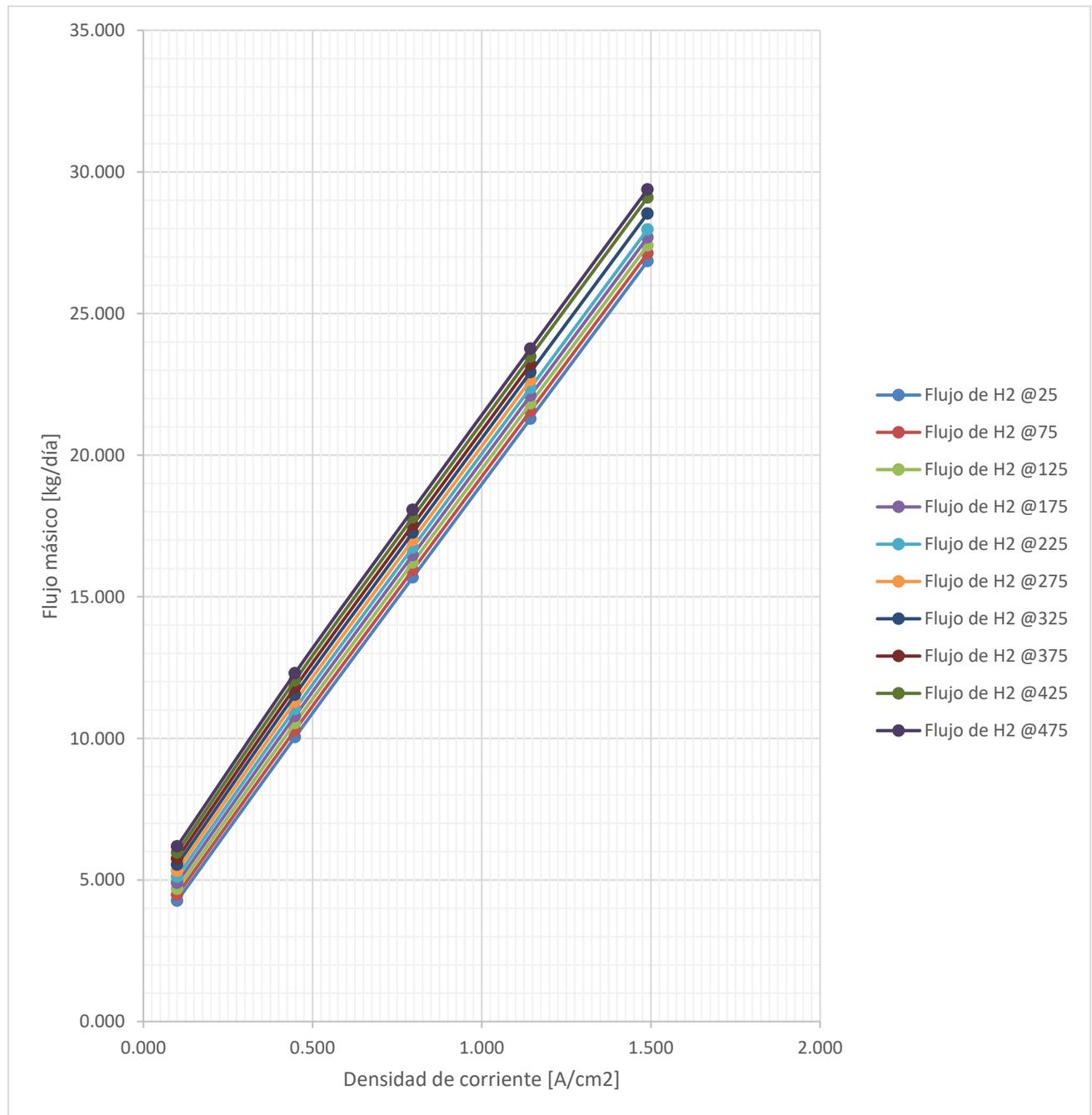
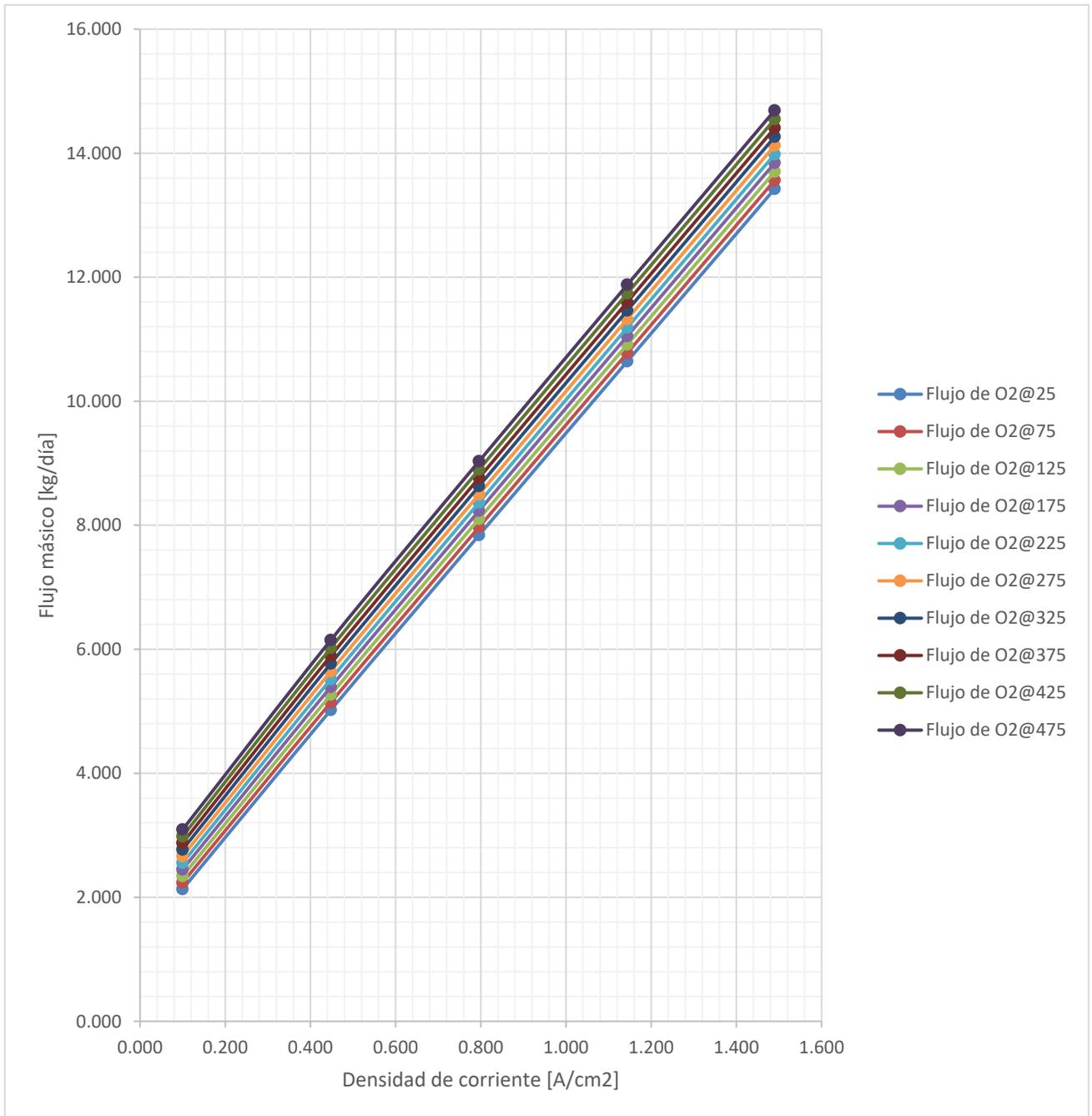
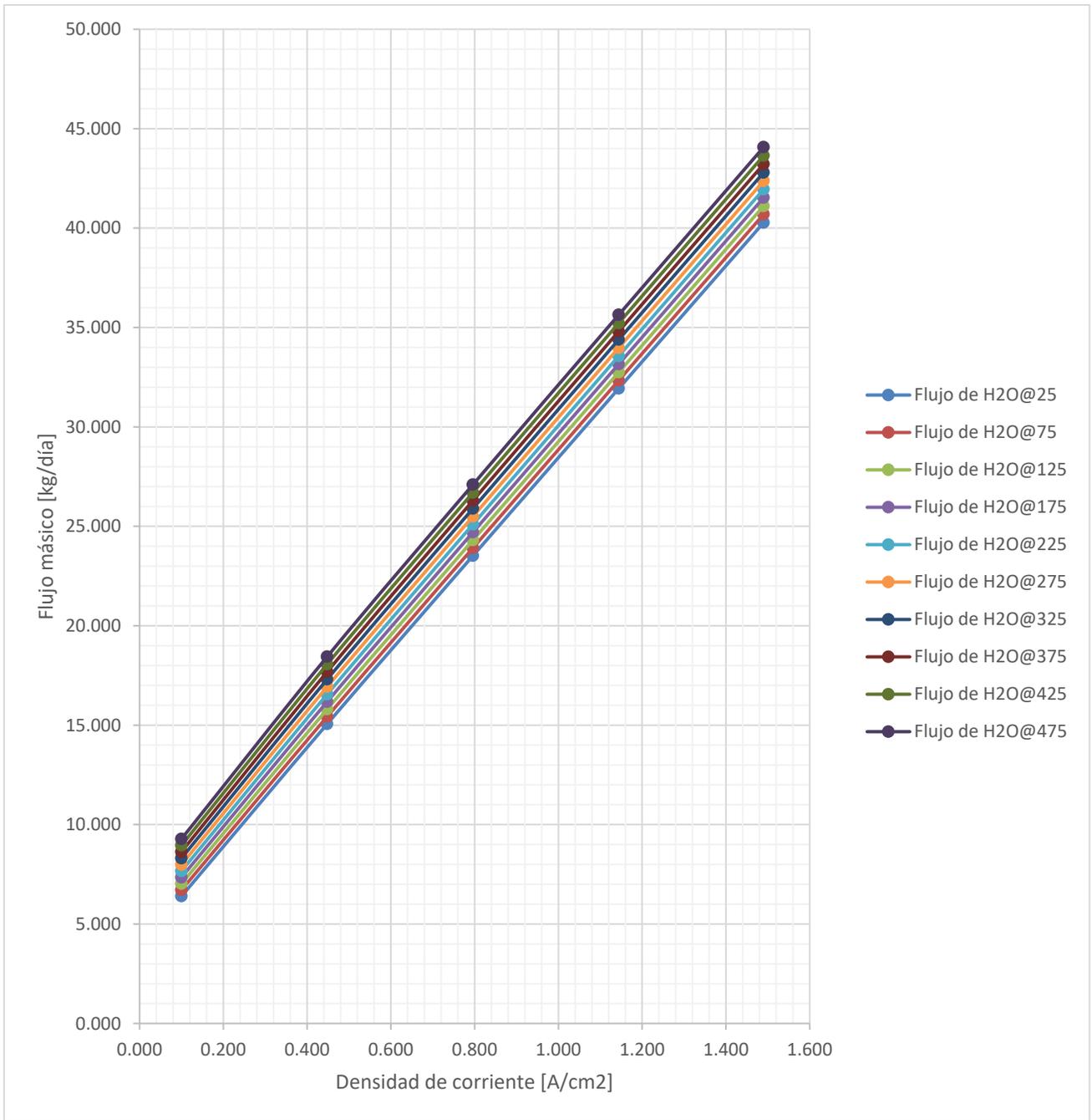


Figura 59 Comportamiento del flujo másico del hidrógeno producido



**Figura 60 Comportamiento del flujo másico del oxígeno producido**



**Figura 61 Comportamiento del flujo másico del agua desionizada requerida**

## ANEXOS DEL CAPÍTULO 4

### FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE REFRIGERANTE DEL CBM IIDEA100



## Datasheet

### Customer:

HidroFluidos S.A. de C.V.  
Av. Paseo de la Reforma No. 6628  
64970 Monterrey, Nuevo León  
Mexico

Francisco Gonzalez

Date: Wednesday, August 25, 2021

Proposal No: 21315P

Item No: Quantity: 1

Service: Refrigerant Pump

SERO Model No: **SRZS 556 US W G12N-HK.60**

X-Ref Model No:

Serial No:

### Service Data:

Liquid:	Refrigerant R1233zd		Speed (RPM):	1750	
Liquid Temp Min / Max:	117	0 °F	Rated/Norm Flow:	93.0	GPM
Specific Gravity:	1.221	@ PT	Rated Head:	494	ft
Viscosity:	0.356	0.292 cP / cSt	Rated HP @ 1.2205 SG:	42.40	HP
Solids:	<b>None</b>		<b>MaxHP @ 1.2205 SG:</b>	<b>52.70</b>	HP
Rated Suction Press:	44	psi	<b>Min / Max Flow:</b>	<b>76.00</b>	106.30 GPM
Rated Discharge Press:	305	psi	<b>NPSHr / NPSHa:</b>	<b>2.90</b>	Unk ft
Differential Pressure:	261	psi			

<b>Pump Design:</b>	Type: Side Channel	Mounting Type: Frame Mount	Nominal Press: 580 psi
	Pump Orientation: Horizontal	Shaft Rotation: CCW when viewed from the coupling end	
	Suction Nom Dia / Pos: 4 in Axial	Suction Conn: DIN (PN40) RF flange w/ ANSI 300# bolt pattern	
	Disch Nom Dia / Pos: 2 in Radial ↑	Discharge Conn: DIN (PN40) RF flange w/ ANSI 300# bolt pattern	
	Seal, Gauge & Drain Connections: R1/4"NPT	Design Option: <b>Normal</b>	
	Radial Ball Bearing: Shielded Grease lubricated		

### Shaft Sealing MAWP: 580 psi

Mechanical Seal Type: Single Balanced Mechanical seal

Mechanical Seal MOC: Silicon Carbide vs Carbon faces w/ Neoprene elastomers

Mech Seal Support Sys: **Mechanical Seal support system not required.**

### Materials:

MOC:	Ductile Iron casings & Brass impellers.	
Suct/Dsch/Imp Casing:	GGG40.3 (DI)	Suction Impeller: GG20 (CI)
Stage/SideChanl Casing:	GGG40 (DI)	Stage Impeller: Brass
Foot:	GGG40 (DI)	Shaft: 1.4021 (420SS)
Mech Seal Housing:	C35 (CS)	Suct Brng Bushing: Carbon/SS
		StageBrngBushing: Bronze
		Bearing Housing: GG20 (CI)

### Electric Motor Type: Motor Not in SERO scope of supply

Electrical:

Inverter Duty:

Mfg / Line / CatNo:

### Baseplate:

Type: Base Not in SERO scope of supply

Dimensions:

Description:

Hardware:

Coupling:

Guard:

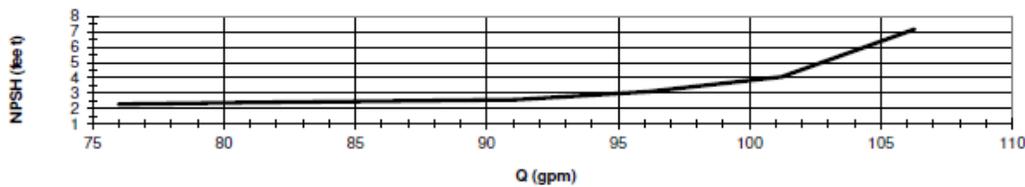
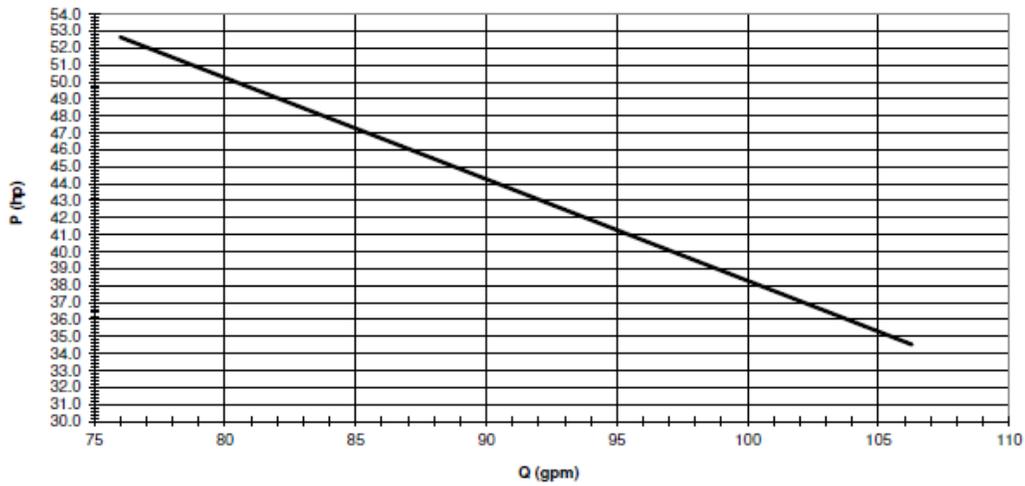
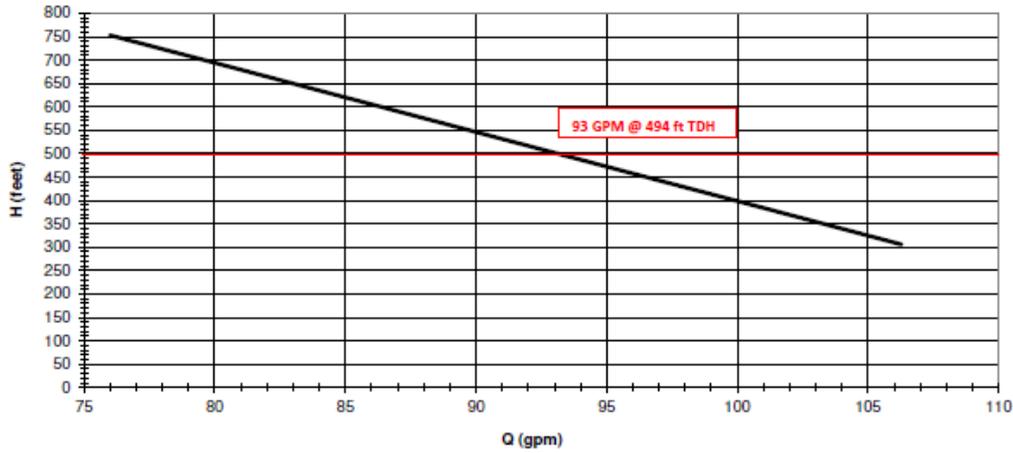
### Comments:

~ This pump sized and selected according to the service conditions in this datasheet. ~

21315P

Proposal No.  
Refrigerant Pump

Model: SRZS 556 US W G12N-HK.60



Power requirement per Max. SG (kg/dm3): 1.221  
Viscosity (cP) / (cSt): 0.3558 / 0.2915

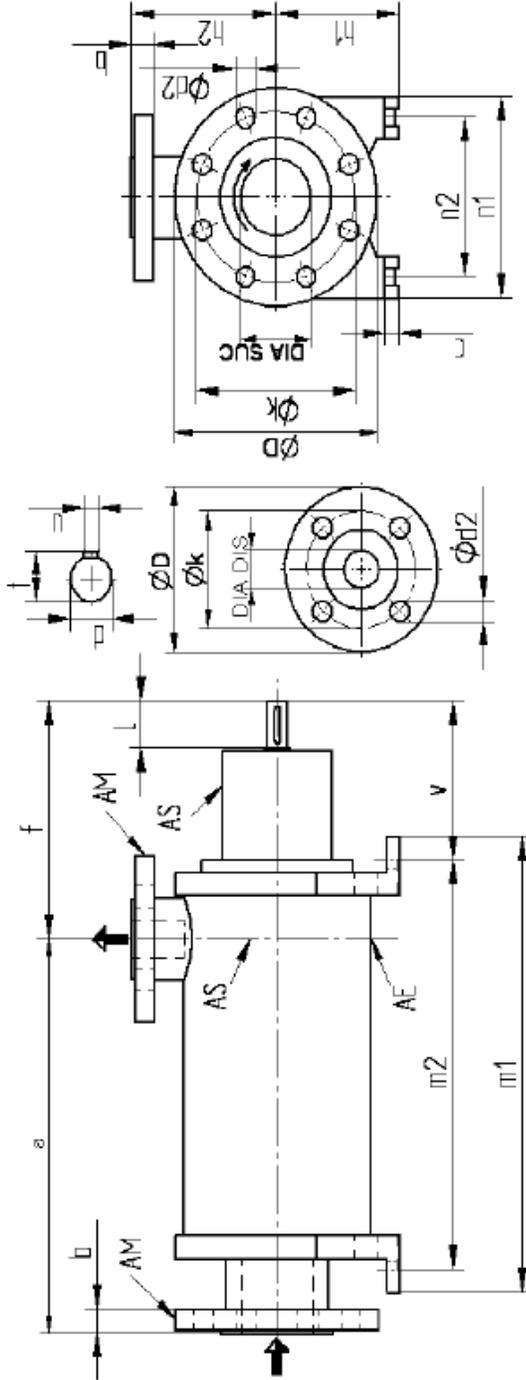
Model: SRZS

Size: 556

MOC: All

Speed: 1750 RPM

Tolerances: H&Q +/-10%, P +14%



**Primary Connections**

NPS & Flange Detail	ANSI (in)	DIN (mm)	D (mm)	k (in)	b (mm)	d2 (in)	# Bolt Holes	Flange Description	Auxiliary Connections			
									Pos	Qty	Size Type	Function
Suction	4	100	235	7 7/8	27	7/8	8	DIN (PN40) RF flange w/ ANSI 300# bolt pattern	AE	1)	R 1/4" NPT	Drain
Discharge	2	50	155	5	20	3/4	8	DIN (PN40) RF flange w/ ANSI 300# bolt pattern	AM	2)	R 1/4" NPT	Gauge - suction / discharge
MOC Ductile Iron casings & Brass impellers.									AS	2)	R 1/4" NPT	Buffer Fluid - In / out - option

**Pump Dimensions**

Pump Size	Weight (lbs)	Nominal Pipe Size (inches)		Pump Dimensions (inches)								Shaft Dimensions (inches)					
		Suction	Discharge	a	m1	m2	c	f	h1	h2	m1	m2	v	d	L	t	u
556	240	4	2	26.77	28.54	27.09	0.71	9.33	6.30	6.50	8.46	6.69	6.26	1.10	1.97	1.22	0.31

HidroFluidos S.A. de C.V.

Refrigerant Pump

## Storage, Handling and Use Guidelines for Solstice<sup>®</sup> zd Refrigerant



Before handling the refrigerant, it is essential that you read the Material Safety Data Sheet (MSDS) for the Solstice<sup>®</sup> zd Refrigerant Grade. Special attention should be given to section 2 on hazards identification, section 4 on first aid measures.

Risk assessment and risk minimisation in facilities typically require evaluation on a case-by-case basis since facilities may vary from one another in many ways. To assist the end-user in assessing and minimising risk in association with the use of Solstice zd, a number of general guidelines can be applied.

### Cylinder Storage

- Store cylinders in a cool, well-ventilated area with low risk of fire and out of direct sunlight. Ensure that cylinders are properly strapped into place, avoid dropping, denting or mechanically abusing containers.
- Store on elevated or concrete floors to avoid tank corrosion, protect cylinders from moisture and rusting during storage.
- Do not store Solstice zd cylinders near sources of open flames and do not allow containers to exceed 50°C.
- Smoking should be prohibited in storage, handling, and servicing areas where Solstice zd is used.

### Accidental Spillage

Solstice zd being a liquefied gas with a boiling temperature of 19°C, in case of accidental spillage, use non-combustible absorbent materials, e.g. sand, earth, vermiculite, diatomaceous earth to contain and collect spillage (see MSDS section 13). Place spilled material in an appropriate container for disposal according to local regulations.

### Handling

Personal Protective Equipment (PPE)

- Gloves
  - Avoid cloth gloves (possible frostbite in contacting liquid)
  - Incidental liquid contact: wear PVA or neoprene gloves
  - Avoid repeated exposure or prolonged contact
- Eyewear
  - Safety glasses for normal operations
  - If liquid contact is probable, wear chemical safety goggles and self-contained breathing apparatus
- Respiratory Protection
  - None for adequately ventilated work areas
  - For accidents or non-ventilated work situations, wear self-contained breathing apparatus

### Personnel Training

- Personnel should know product hazards and have access to MSDSs
- Personnel should be trained to handle refrigerants and hold appropriate certifications
- There should be a written emergency response plan and each person know his/her responsibility in case of an emergency and is properly trained

### Off loading Procedure – General Indications

Because of its properties, the use of Solstice zd requires attention in the equipment and setup.

The very low vapour pressure values require additional steps for off loading cylinders and tanks, compared to other products:

- 1. Before off loading the product, it is suggested to store the container indoor overnight, if possible**
  - 2. The use of a heating blanket will facilitate the off loading, alone or in combination with 1)**
  - 3. The use of a pump is required, alone or in combination with 1) and 2)**
- Make sure you always operate in a clean safe area:
    - ensure enough clearance to walk around the container
    - ensure connections are visible, to allow visual leak check
    - keep environment noise low, to allow hearing leaks
    - do not leave connection hoses suspended
    - do not step over pressurised hoses
  - Continuously check pressure values during the whole process
  - Read the Material Safety Data Sheet (MSDS). A paper copy of the MSDS is included in the shipping documents.
  - Always Use Personal Protection Equipment (PPE), minimally, chemical resistant goggles (eyes) and gloves (hands).

### Off loading from a Cylinder

- Cylinders should be stored in a covered environment, no direct sunlight
- A standard cylinder contains 70 kg of product
- The tare weight of the cylinder is 28 kg
- Standard cylinder dimensions are: 1.1m height x 0.3m diameter
- The standard valve outlet thread is DIN 477 (21.8mm)
- Weigh the cylinder to verify initial value (tare can vary slightly)
- Position the cylinder in the work area
- An internal dip tubes reaches the lowest point inside the cylinder, to extract all liquid
- Connect the transfer hoses to the valve outlet and the pump, and install a pressure gauge
- Install a sight indicator on the line to process (or pump outlet)
- Open liquid phase valve and start pump, to start the outlet flow; perform a leak check
- If liquid flow stops, please check the following:
  - The cylinder may be empty. This can be confirmed by verifying the weight
  - Check pressure difference (cylinder compared to process)
  - Check the pump for cavitation
- Once the product is transferred completely, close the valve on cylinder
- Depressurise liquid line from cylinder valve to pump
- DO NOT leave liquid filled piping blocked with no pressure relief
- Disconnect hoses
- Store in suitable storage area
- Return the empty cylinder to Honeywell



### Off loading from a Vertical Drum (VD)

- VDs should be stored in a covered environment, no direct sunlight
- A standard VD contains 1000 kg of product
- The tare weight of the VD is approximately 600 kg
- Standard VD dimensions are: 1.8m height x 0.8m diameter

- The standard valve outlet thread is 1¼ BSW

- Weigh the VD on a scale to verify initial value (tare can vary slightly)

- Position the VD in the work area

- The valves are identified, the liquid phase valve has an internal dip tube that reaches the lowest point inside, to extract all liquid

- Connect the transfer hose to the liquid valve outlet and the pump, and install a pressure gauge. Depending on the application, a vapour return line can be connected to the vapour side valve (loop setup)

- Install a sight indicator on liquid line to process (or pump outlet)

- Open liquid phase valve and pump to start the outlet flow to process (perform a leak check)

- If liquid flow stops, please check the following:
  - The VD may be empty. This can be confirmed by verifying the weight
  - Check pressure difference (VD compared to process)
  - Check pump for cavitation

- Once the product is transferred completely, close the valves on the VD

- Depressurise liquid line from VD to pump

- DO NOT leave liquid filled piping blocked with no pressure relief

- Disconnect hoses

- Store in suitable storage area

- Return the empty VD to Honeywell



### Off loading from a Roll Drum (RD)

- Roll drum storage: Covered environment, no direct sunlight

- A standard Roll Drum contains 907 kg of product

- The tare weight of the Roll Drum is 472 kg

- Standard Roll Drum dimensions are: 2.4m length x 0.8m diameter

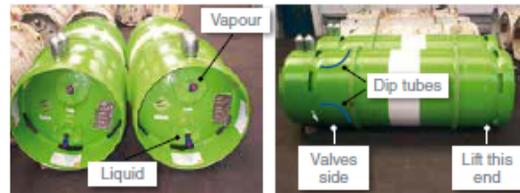
- The standard valve outlet thread is 1¼ BSW

- Weigh the roll drum to verify initial value

- Position the roll drum in the work area, levelled horizontally, or slightly tilted (lift the end opposite to the valves, about 10 cm)

- Align valves along a vertical line. The valve in the lower position will be the liquid phase

- With the roll drum in this position, the dip tubes will reach the lowest and highest points, respectively for liquid and vapour



- Connect the transfer hoses to the valves outlet, and install a pressure gauge on each side:

- Connect the bottom valve (Liquid) to pump suction or process pipe

- Depending on the use, a vapour return line can be connected to the vapour side valve (loop setup)

- Open liquid phase valve to start the outlet flow to process (perform a leak check)

- Install a sight indicator on liquid line to process (or pump outlet)

- If liquid flow stops, please check the following:

- The Roll Drum may be empty. This can be confirmed by verifying the weight on a scale
- Check pressure difference (roll drum compared to process)
- If using a pump, check for cavitation

- Once the product is transferred completely, close the valves on roll drum

- Depressurise liquid line from roll drum valve to process

- DO NOT leave liquid filled piping blocked with no pressure relief

- Disconnect hoses

- Store in suitable storage area

- Return the empty Roll Drum to Honeywell

### Possible causes of inability to completely empty the container

- Insufficient pressure in the roll drum will cause the liquid flow to stop

- Excessive pressure in the roll drum leads to expansion across outlet valve

- High pressure in the receiving vessel the refrigerant is being transferred to

- Low ambient temperatures will increase the liquid density, and make the liquid transfer more difficult

- High ambient temperatures will generate possible expansion through the outlet valve

- Pump cavitations, generated by expansion (high temperature) or density increase (low temperature)

- Attempting to achieve excessive flow rate: dip tubes in roll drums are small diameter, as well as the orifice in the valve. Excessive flow rate leads to expansion across the valve.

### Leak Detection

- Periodic leak checks are required during storage

- Constant monitoring for leaks is required during off loading operations

- Continuous Refrigerant leak detection equipment

- Continuous monitoring systems provide alerts to respond in a timely fashion

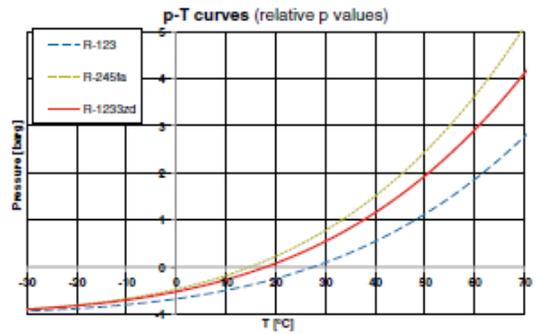
- Detection levels of 1.5 vol% (15,000 ppm) are acceptable.
  - Most continuous monitoring equipment detect very low levels
- Leak detector performance may vary. Consult the manufacturer
- Handheld or Portable Leak detectors
  - Valuable for maintenance operations and assembly line workers
  - Detect at extremely low levels (<4 g/year leak sizes)
- Add to scheduled routine maintenance operations
  - Check storage containers for leaks
  - Check piping for leaks
- In the event of a leak exceeding 1.5 vol%:
  - Remove personnel and ventilate the area

### Solstice® zd properties

Molar Mass	130.5kg/Kmol
Triple point temperature	-78°C
Normal Boiling point	18.32°C
<b>Critical point</b>	
Temperature	165.6°C
Pressure	3572.6kPa
Density	478.92 kg/m <sup>3</sup>

T [°C]	Vapour p [Mpa]	Liquid Density [kg/m <sup>3</sup> ]
-10	0.03	1339.6
0	0.047	1326.7
10	0.072	1312.9
20	0.106	1298.1
30	0.152	1282.2
40	0.212	1265.1
50	0.29	1246.7
60	0.387	1226.7
70	0.508	1204.9
80	0.656	1181.2
90	0.835	1155.1
100	1.048	1126.3

### Solstice zd compared to similar products



	Molar Mass	Critical T [°C]	Normal Boiling Point [°C]	GWP	ODP
R-11	137	197.6	23.71	4750	1.000
R-123	153	183.7	27.82	77	0.020
R-245fa	134	154.01	15.14	1030	0.000
Solstice zd	131	165.5	19.00	1	0.000